

MÉTHODES DE VÉGÉTALISATION DANS LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE DE SITES
MINIERS : COMPARAISON ENTRE LE QUÉBEC ET LE PÉROU

Par

Stéphanie Thomas

Essai présenté au Département de biologie et au Centre universitaire de formation en
environnement en vue de l'obtention des grades de maître en écologie internationale et
maître en environnement (maîtrise en biologie incluant un cheminement de type cours en
écologie internationale et maîtrise en environnement avec un cheminement de type cours en
gestion de l'environnement avec stage (M.E.I./M.Env)

FACULTÉ DES SCIENCES
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Sherbrooke, Québec, Canada, 2 novembre 2012

Sommaire

Il est attendu que plusieurs grands chantiers miniers fermeront leurs portes à brève échéance dont plusieurs se produiront dans les pays en développement. La plupart des pays développés possèdent une législation détaillée et contraignante pour les entreprises exerçant des activités minières. Cependant, il n'est pas toujours le cas dans les pays en développement puisque que leur législation possède des lacunes concernant ces activités. Ainsi, certains sites miniers dans ces pays sont, soit abandonnés ou restaurés, mais de façon sommaire. Ces lieux sont alors responsables de plusieurs types de répercussions tant environnementales que sociales. Plusieurs éléments liés à la végétalisation doivent être intégrés lors de la restauration pour assurer que la mise en végétation du site soit réalisée de manière responsable et permettre la reconstruction des écosystèmes détruits.

C'est pourquoi le Québec et le Pérou, représentant une province d'un pays développé et un pays en développement, ont d'abord été choisis afin de comparer les différences existantes dans leurs législations étant donné que les exigences demandées en matière de restauration découlent directement des textes de loi. Ensuite, une analyse critique des éléments à intégrer lors de la végétalisation est discutée afin de supporter l'utilisation de méthodes adéquates lors de la restauration écologique d'un site minier.

Cet essai a comme objectif de mettre en évidence certaines bonnes pratiques pour améliorer celles employées dans le secteur minier. Une grande part des recommandations repose sur chacune des principales parties prenantes impliquées. Pour les entreprises, il est recommandé que celles-ci utilisent la planification pour certifier le succès des programmes de restauration et incluent la conservation de la biodiversité. En ce qui concerne les communautés, celles-ci doivent être incluses dans toutes les décisions qui concernent l'utilisation de leur territoire. Cependant, c'est au rôle du gouvernement qu'incombe la responsabilité d'impliquer et de consulter les communautés affectées. Les gouvernements doivent également certifier que les entreprises qui exploitent les gisements le font de manière responsable en s'assurant que la législation en place est détaillée, contraignante et oblige les entreprises à épargner des garanties financières nécessaires pour couvrir les coûts de la

restauration. De plus, ils doivent s'assurer de prendre en charge les anciens sites miniers abandonnés. Finalement, le développement durable devrait être intégré dans tout le processus des activités impliquant le domaine minier.

Remerciements

Plusieurs personnes ont contribué à la réalisation de ce travail. Tout d'abord, je tiens à remercier Aurora Hernandez, ing, M. Sc., qui a consenti de diriger cet essai, qui m'a initié au secteur minier pendant mon stage à l'Administration régionale cri et qui a su capter mon intérêt pour ce domaine. Je remercie également Kelly Leblanc, qui gère l'analyse de plusieurs études d'impacts miniers qui touchent Eeyou Istchee, soit le territoire cri du Québec, qui a également bien voulu m'appuyer dans les démarches nécessaires afin d'orienter le sujet de l'essai et qui a été une source de motivation pour cette épreuve qui m'attendait.

Je suis reconnaissante envers Aurora pour m'avoir soutenue pendant toute la durée de la rédaction grâce à ses réflexions constructives et son intérêt marqué pour le sujet. Je remercie aussi Bill Shipley pour ses commentaires pertinents et ses réflexions qui m'ont permis d'approfondir certaines sections de l'essai.

Pour leur encadrement académique et administratif, je suis redevable envers Caroline Cloutier et Judith Vien qui ont cru en moi et en mon sujet.

Je désire finalement remercier ma famille et mes amis pour leurs encouragements et leur soutien pendant toute la durée de l'essai en particulier ma mère qui a gentiment accepté de réviser le document en entier et mon amoureux pour sa motivation, sa présence et sa compréhension surtout pendant les périodes plus difficiles.

Table des matières

SOMMAIRE	i
REMERCIEMENTS.....	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	iv
LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX.....	viii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 - MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE	4
1.1 Contexte de la fermeture minière dans les pays en développement.....	4
1.2 Contexte de la fermeture minière au Québec	6
1.3 Contexte économique, social et environnemental.....	7
1.4 Trois parties prenantes principales.....	8
CHAPITRE 2 - ÉTAPES DU PROCESSUS MINIER.....	10
2.1 Exploration	11
2.2 Exploitation.....	12
2.2.1 Types d'exploitation de mines	15
2.3.1 Définition de la restauration écologique	21
2.3.2 Succession spontanée versus réhabilitation manuelle.....	23
CHAPITRE 3 - IMPACTS DE L'EXPLOITATION ET DE LA RESTAURATION D'UN SITE MINIER	25
3.1 Impacts de l'exploitation	25

3.1.1 Environnementaux.....	25
3.1.2 Sociaux et économiques	31
3.2 Impacts de la fermeture et de la restauration	33
3.2.1 Environnementaux.....	33
3.2.2 Sociaux et économiques	35
3.3 Conclusion.....	36
CHAPITRE 4 - CONTEXTE DE LA LÉGISLATION ET DES OBLIGATIONS CONCERNANT LA RESTAURATION	37
4.1 Généralités des pays développés	37
4.2 Cas du Québec	38
4.2.1 Lois et règlements applicables	39
4.2.2 Convention de la Baie-James et du Nord québécois	40
4.2.3 Guide et modalités de préparation du plan et exigences générales en matière de restauration des sites miniers au Québec	41
4.3 Généralités des pays en développement	42
4.4 Cas du Pérou	43
4.4.1 Lois et règlements applicables	44
4.4.2 Guía para la elaboración de planes de cierre de minas	46
3.5 Conclusion du contexte législatif et des obligations de la restauration	47
CHAPITRE 5 - DISCUSSION SUR LES ÉLÉMENTS ESSENTIELS À INTÉGRER LORS DE LA VÉGÉTALISATION	48
5.1 Caractéristiques des sites miniers.....	49
5.2 Méthodes de stabilisation des résidus miniers	51

5.3	Topographie	55
5.4	Substrat	55
5.4.1	Sol	56
5.4.2	Substrat alternatif	62
5.5	Sélection des espèces	63
5.5.1	Plantes tolérantes aux métaux	64
5.5.2	Irrigation.....	66
5.6	Méthodes d'ensemencement	67
5.6.1	Utilisation de graines	68
5.7	Retour de la faune.....	70
5.8	Critères de performance et méthodes de suivi.....	71
CHAPITRE 6 - RECOMMANDATIONS		75
6.1	Planification	75
6.2	Conservation de la biodiversité	80
6.3	Garanties financières	82
6.4	Implication des communautés locales.....	86
6.5	Rôle des gouvernements et importance de la législation	88
6.6	Intégration du développement durable	90
6.7	Prise en charge des sites orphelins.....	92
CONCLUSION.....		94
LISTE DE RÉFÉRENCES		96
BIBLIOGRAPHIE		104

ANNEXE 1 – Liste des pays en développement considérés pays miniers base sur le pourcentage d'exportations minières, 1990-1999	105
--	-----

Liste des figures et des tableaux

Figure 1.1	Étapes du processus de développement minier	5
Figure 2.2	Étapes de la concentration du minerai	14
Figure 2.3	Mine à ciel ouvert	16
Figure 2.4	Mine souterraine	17
Figure 2.5	Continuum de la restauration écologique du rehaussement de la valeur pour la conservation à la reconstruction	22
Figure 6.1	Étapes de la planification conceptuelle de la restauration écologique	79
Tableau 2.1	Production mondiale de quelques métaux et minerais. (Mt a^{-1}).....	11
Tableau 3.1	Concentrations moyennes létales pour le crapaud (<i>Gastrophryne carolinensis</i>), la truite arc-en-ciel (<i>Oncorhynchus mykiss</i>) et le poissons rouge (<i>Carassius auratus</i>)	27
Tableau 3.2	Valeurs de pH maximales tolérables par différentes espèces aquatiques	31
Tableau 5.1	Caractéristiques des plantes pour la phytoextraction et la phytostabilisation .	54
Tableau 5.2	Variabilité des techniques de restauration utilisées sur les sites miniers basée sur la toxicité, l'acidité et la salinité des résidus miniers.....	61
Tableau 6.1	Caractéristiques écosystémiques pour les considérations des objectifs de la restauration écologique	77
Tableau 6.2	Options financières possibles pour couvrir les frais liés à la fermeture	84

Introduction

L'extraction minière est un secteur d'activité mondial essentiel au développement économique. Ces métaux et minéraux extraits par l'industrie minière sont intégrés dans plusieurs biens de consommation. Étant donné l'augmentation de la population et de la demande pour ces biens, l'industrie minière est en croissance mondialement depuis quelques décennies. Ces mines ont une durée d'exploitation variable et plusieurs d'entre elles, situées dans les pays en développement, et ouvertes il y a quelques dizaines d'années, sont sur le point de fermer leurs portes.

Ce type d'industrie est responsable de plusieurs impacts pendant chacune des phases du processus minier. Plus particulièrement, c'est durant la phase d'exploitation que les écosystèmes naturels, se trouvant au-dessus des gisements, sont détruits par l'élimination du sol et de la végétation et par l'établissement de sites d'entreposage pour les rejets miniers. Ainsi, l'extraction des ressources minières possède une durée définie alors que les impacts environnementaux associés, peuvent être visibles indéfiniment si aucune mesure corrective n'est apportée. C'est pourquoi lorsque l'extraction est terminée, la phase de la restauration est tout aussi importante puisqu'elle permet de remédier à ces impacts par la reconstruction de nouveaux écosystèmes et en redonnant au site une allure naturelle par le biais de la végétalisation. Une restauration dite responsable assure également que les impacts sociaux et économiques positifs apportés par l'exploitation minière soient durables pour les prochaines générations.

Au cours des années 1900, lorsqu'une mine située dans un pays en développement avait exploité tout son minerai, celle-ci était simplement fermée et abandonnée par la suite. Depuis ce temps, plusieurs pays ont fait des progrès en prenant conscience que la fermeture ne se limite pas seulement à l'arrêt de production, mais bien en intégrant la notion de restauration des lieux. Selon le pays, il y a encore beaucoup de domaines où des avancements peuvent être mis en place afin d'améliorer les travaux liés à la fermeture dite responsable. Ces

améliorations dépendent de plusieurs éléments, mais celui qui a une incidence directe sur les exigences demandées est la législation. Cet élément est primordial puisque les entreprises sont dans l'obligation de se conformer aux textes de loi en vigueur sinon des recours légaux peuvent s'en suivre.

L'essai présenté aborde comme objectif principal l'analyse de différentes méthodes utilisées afin de procéder à la végétalisation lors de la restauration écologique de sites miniers. Pour y parvenir, une comparaison critique entre le Québec et le Pérou, représentant les pays développés et ceux en développement, a été réalisée pour en exposer les différentes exigences contenues dans leur législation. Le Pérou a d'ailleurs été choisi pour les nombreuses modifications et améliorations apportées récemment à sa législation entourant l'extraction et la restauration minière. Des recommandations sont formulées sous forme de bonnes pratiques pour encourager les pays en développement à rectifier leurs obligations en terme de restauration de sites miniers pour davantage inciter les entreprises à extraire les ressources minérales de façon responsable.

La rédaction de cet essai est également basée sur quatre autres objectifs secondaires. Le premier vise à décrire les étapes du développement minier afin de comprendre le contexte de la restauration et les impacts environnementaux, sociaux et économiques associés. Le second concerne la description de la législation et des obligations concernant la fermeture des mines au Québec et au Pérou et mettre en évidence leurs différences. Le troisième est de discuter, de façon critique, des aspects écologiques et des bonnes pratiques à mettre en œuvre lors de la revégétalisation d'un site minier et finalement le dernier objectif est d'émettre des recommandations basées sur les différences observées entre les pays en développement et ceux développés afin de mieux encadrer la restauration de sites miniers.

Cet essai comprend la mise en contexte et la problématique qui décrivent la situation de la restauration minière touchant les pays en développement et celle impliquant particulièrement le Québec. De plus, les contextes économique, social et environnemental ainsi que les principales parties prenantes entourant l'extraction et la restauration minière sont abordés

pour permettre au lecteur de cerner le sujet. Ensuite, le premier chapitre décrit les étapes du processus minier ainsi que les différentes composantes d'un site minier. Le second chapitre explique les différents impacts attribuables aux phases de l'exploitation et de la restauration. Le troisième chapitre aborde le contexte de la législation et des obligations relatives à la restauration d'un site minier dans un contexte plus général touchant les pays du Nord et du Sud et plus spécifiquement celles du Québec et du Pérou pour en souligner les différences. Le quatrième chapitre est structuré de façon à analyser les éléments importants à intégrer lors de la mise en végétation pendant la restauration. Enfin, le dernier chapitre expose différentes recommandations rédigées sous forme de bonnes pratiques.

Chapitre 1

Mise en contexte et problématique

Cette section du travail a pour but de mettre en contexte la fermeture prévisible de plusieurs sites miniers situés dans les pays en développement et de souligner l'importance de la restauration adéquate de ceux-ci. Puisque la situation vécue est semblable à celle du Québec, ce contexte est retenu. Après, les contextes économique, social et environnemental sont expliqués pour permettre au lecteur de bien comprendre la situation actuelle affectant le secteur minier. Cette section se termine avec une description des trois parties prenantes les plus importantes pour assurer le succès de la restauration de sites miniers.

1.1 Contexte de la fermeture minière dans les pays en développement

Actuellement et dans les prochaines années à venir, il est attendu qu'un grand nombre de mines présentement en production, fermeront leurs portes et procéderont à la restauration d'un nombre important de sites miniers. En se basant sur la prévision de la Banque Mondiale et la Société financière internationale, 25 grands chantiers miniers arrêteront leur production minière entre 2002 et 2012 (World Bank et International Finance Corporation, 2002b). En effet, plusieurs raisons peuvent expliquer cette vague. Durant les années 1960, 1970 et 1980, il s'est passé une augmentation des investissements et de la privatisation de plusieurs grands chantiers miniers et celles-ci, étant en opération depuis plusieurs années, sont sur le point d'avoir extrait les réserves disponibles. De plus, plusieurs des mines en opération fonctionnent grâce à de vieilles technologies très coûteuses et l'augmentation des pressions sur le marché économique mondial laisse seulement la place aux producteurs qui sont les plus rentables (World Bank et International Finance Corporation, 2002a).

Plusieurs de ces grands sites d'extraction sont surtout situés dans des pays en développement du fait qu'à travers le monde, la majorité des pays producteurs de métaux et

de minéraux sont en développement ou sont émergents. En effet, avec l'augmentation de la mondialisation et de la privatisation des entreprises minières, une grande part de l'investissement liée à l'exploration et la production est destinée aux pays en développement et émergents. Le secteur minier est d'ailleurs important dans 51 pays en développement, qui survivent principalement grâce aux exportations et qui dépendent directement de l'extraction de minerais et métaux comme source de revenus et moyen de développement. Il est donc important de se préoccuper de la restauration de sites miniers dans ces pays puisque, basé sur la croissance de la population et celle des biens de consommation, la demande en métaux et en minéraux augmente au même rythme (tableau 1.1)

Tableau 1.1 : La production mondiale de quelques métaux et minerais (Mt a⁻¹)

	1945	1961	1984	1995
Argent	0,005	0,007	0,009	0,015
Fer	157	499	804	1018
Aluminium	4,0	13,8	24,9	21,5
Cuivre	3,9	13,7	69,3	114,4
Chrome	1,1	4,2	9,2	12,1
Plomb	1,2	2,4	2,3	2,7
Nickel	0,15	0,37	0,7	1,0
Étain	0,09	0,16	0,16	0,18
Zinc	1,6	3,3	5,0	6,7

Traduction libre

Source : Cooke et Johnson, 2002

Le niveau d'effort ainsi que les obligations imposées pour la restauration des sites miniers découlent directement de la législation du pays où l'extraction minière est réalisée. Dans plusieurs pays en développement, la loi n'est pas détaillée sur les contraintes liées au droit minier comparativement aux pays développés. Ceci a eu comme répercussion que les gouvernements de plusieurs pays ont hérité de sites miniers abandonnés et de leur restauration puisque les entreprises exploitantes n'existaient plus ou avaient déménagées. Ainsi, pour éviter l'apparition de nouveaux sites abandonnés, la législation doit être actualisée

en fonction des nouvelles connaissances et des technologies disponibles pour s'assurer, du même coup, de minimiser les impacts causés par l'exploitation minière. C'est pourquoi le Pérou a été choisi pour représenter les pays en développement basé sur plusieurs aspects, dont les modifications apportées à la législation concernant les activités minières et la restauration.

1.2 Contexte de la fermeture minière au Québec

La situation vécue actuellement par les pays en développement est semblable à celle du Québec, il y a quelques années. En effet, c'est surtout depuis les années 1990 que la restauration des sites miniers s'est grandement améliorée grâce aux efforts conjoints du gouvernement et des entreprises minières (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2011a). Dans un premier temps, le gouvernement du Québec a financé des travaux de recherche afin de perfectionner les méthodes de restauration. Également, la *Loi sur les mines* soit la section de la législation qui légifère les responsabilités des entreprises minières, a été modifiée afin d'obliger les entreprises à faire approuver un plan de restauration pour les sites miniers actifs (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2011a). De plus, le gouvernement devait trouver une solution pour les anciens sites miniers laissés à l'abandon par des entreprises, sans n'avoir pris aucune mesure pour les restaurer. Ces sites posaient des problèmes importants, dus au fait que les entreprises attribuaient peu d'importance au risque de contamination provenant des résidus miniers. Actuellement, il existe plus d'une centaine d'aires d'entreposage de résidus miniers abandonnés à être restaurés (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2011a).

Ainsi, le gouvernement a lancé le programme de restauration des sites miniers de l'État (Ministère des Ressources naturelles, 2011c). Au début, 11 sites étaient visés situés en Abitibi-Témiscamingue, Mauricie-Bois-Francs et en Gaspésie. Ainsi, les travaux de recherches ont permis de développer des technologies innovatrices telles que la valorisation des matières résiduelles afin de réduire les coûts encourus par la restauration d'un site et de résoudre en partie la problématique d'entreposage des résidus (Ministère des Ressources

naturelles, 2011c). Cependant, il reste encore des centaines d'aires d'accumulation des résidus miniers qui ont été abandonnés dans le passé (Ministère des Ressources naturelles, 2011c).

Les obligations législatives possèdent une place encore plus importante, surtout depuis l'annonce de la mise en application du Plan Nord québécois. Ce projet vise directement le développement économique, social et environnemental de la région du Nord québécois, qui est la région qui contient les plus importantes réserves en ressources minérales et des conditions abiotiques qui rendent difficile la révégétalisation. Prévu se déployer sur une durée de 25 ans, des investissements de plus de 80 milliards sont annoncés servant à créer en moyenne 20 000 emplois par année (Gouvernement du Québec, 2011).

1.3 Contexte économique, social et environnemental

Dans plusieurs cas, où les mines sont situées dans les régions éloignées des centres urbains, l'entreprise minière est le principal fournisseur économique de la région en procurant de l'emploi, des revenus et des services aux habitants locaux. Lorsqu'une mine est appelée à fermer ses portes, les impacts sur le bien-être des communautés situées aux proximités sont encore plus significatifs. Ses impacts sont d'ailleurs visibles dans les pays en développement où il y a peu ou pas d'économie alternative et où les gouvernements et les communautés manquent de ressources afin de les mettre en place. Dans la plupart des cas, la communauté et l'entreprise minière développent une relation interdépendante sur l'embauche, l'offre de services, les infrastructures, les enjeux liés aux impacts environnementaux et sur les taxes et redevances. Ce niveau d'intégration varie selon plusieurs facteurs incluant l'âge et la location de la mine, l'approche de l'entreprise envers la communauté, les politiques gouvernementales de la région et la structure de l'économie locale et régionale (World Bank et International Finance Corporation, 2002a). Dans certains pays, le revenu fiscal du secteur minier représente une proportion de 25 à 30 % qui est extrêmement profitable pour le développement de la communauté et du pays.

La restauration et la fermeture responsable d'un site minier impliquent le retrait de tous les équipements et produits dangereux, le nivellement des terres et les mesures nécessaires pour éviter toutes sources de pollution possibles. Plusieurs pays, surtout situés en Amérique du Nord et en Australie ont reçu comme héritage de fermetures non planifiées, des travaux non sécuritaires et des sites non remis en état. Cette situation se produit en pays en développement surtout lorsqu'il y a un manque de financement disponible au moment de la fermeture (World Bank et International Finance Corporation, 2002a). En ce qui concerne les activités minières, la production, l'entreposage et l'élimination de rejets miniers sont l'enjeu le plus important qui cause les perturbations les plus intensives et souvent à très long terme. De plus, en combinant l'augmentation de la demande pour des métaux et des minéraux avec des techniques d'extraction plus perfectionnées, des gisements possédant des grades inférieurs sont maintenant exploités créant ainsi de plus grandes quantités de rejets et augmentent les impacts potentiels sur l'environnement (Cooke et Johnson, 2002).

1.4 Trois parties prenantes principales

Au travers des années, la fermeture d'une mine est devenue un des plus importants enjeux regroupant trois parties prenantes principales soit les entreprises minières, les communautés locales autochtones et non autochtones ainsi que les gouvernements des pays où se déroule l'extraction minière. En plus, chacune d'entre elles est directement touchée par le niveau d'engagement des autres. Si toutes les trois sont impliquées, cela permet à long terme de réduire les coûts et améliorer les résultats pour les parties impliquées. Ainsi, les entreprises doivent prendre en charge les risques liés à la sécurité et aux enjeux sociaux et environnementaux, tel que la protection de l'environnement et les droits des communautés sinon des conséquences désastreuses peuvent survenir et affecter leur réputation. Pour les communautés, elles doivent continuellement gérer la possibilité d'un effondrement économique et social pouvant même affecter la région en entier et s'assurer que les bénéfices obtenus par l'exploitation minière seront durables pour les générations futures. Celles-ci doivent également prendre part aux décisions par différents types de participation publique. Pour les gouvernements, les mines abandonnées peuvent être la source

d'importantes responsabilités environnementales et économiques et doivent ainsi s'assurer d'avoir un cadre juridique adéquat et assez détaillé afin d'influencer le niveau d'effort des entreprises (World Bank et International Finance Corporation, 2002b).

Chapitre 2

Étapes du processus minier

Les étapes du processus minier se composent d'abord des travaux d'exploration, soit la recherche d'un gîte minéral, et ensuite des travaux d'exploitation qui se caractérisent par l'ouverture d'une mine et la production de minerai. Une fois tout le minerai extrait, les entreprises doivent procéder à la fermeture et à la restauration du site minier, soit la dernière étape. Plusieurs des éléments présents dans chacune des étapes sont ceux décrits pour les activités se déroulant au Québec. En ce qui concerne les particularités touchant le Pérou, celle-ci est décrite à la fin de chaque section lorsque les informations étaient disponibles. La figure 2.1 illustre les étapes majeures du processus minier. Les phases de planification et de construction ont été intégrées à l'étape de l'exploitation.

Il existe plusieurs approches afin de procéder à la restauration d'un site dont la végétation et le substrat ont été retirés. C'est pourquoi il a été jugé nécessaire de différencier les termes gravitant autour de la restauration et de préciser la direction choisie afin d'orienter l'essai. De plus, l'utilisation de la végétalisation est abordée étant donné que cette technique est la seule qui permet de stabiliser les résidus miniers à long terme (Tordoff *et al.*, 2000).

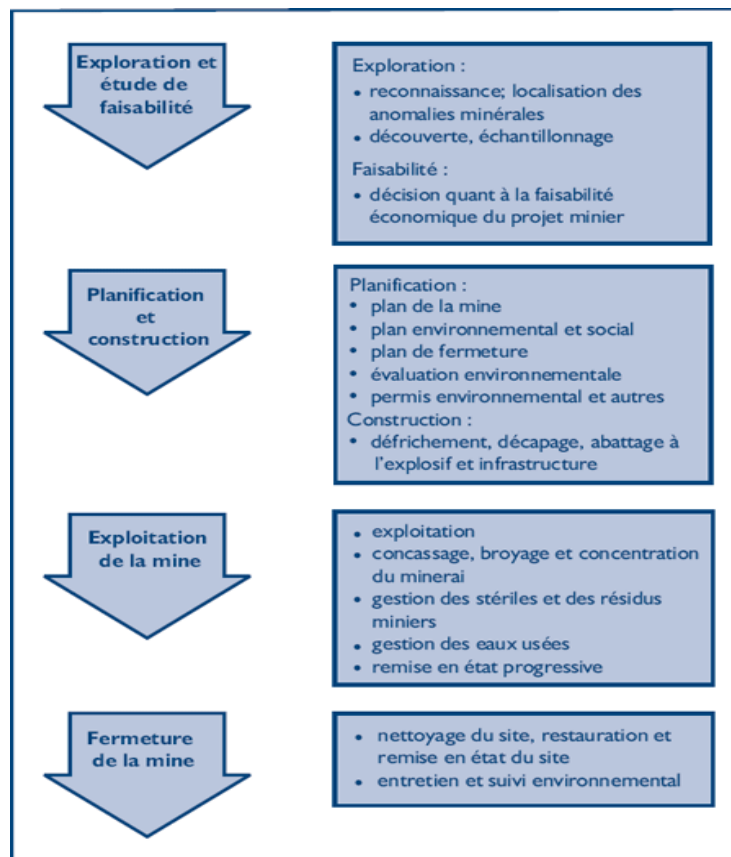


Figure 2.1 Étapes du processus de développement minier

Source : Environnement Canada (2011a).

2.1 Exploration

L'exploration est la première étape du développement minier qui sert principalement à trouver de nouvelles réserves minérales contenant des minéraux, des métaux ou des pierres précieuses. Il existe plusieurs types d'exploration soit les travaux d'explorations préliminaires qui désignent la recherche ou la prospection de réserves minérales dans une région où aucun minéral ou métal n'a pas encore été trouvé. L'exploration avancée ou la mise en valeur définit les travaux nécessaires afin de quantifier et qualifier un gîte minéral qui a été découvert (Gouvernement du Canada, 2006). L'exploration avancée a pour objectif de

déterminer la valeur potentielle du gisement minéral pour assurer la rentabilité de l'exploitation d'une mine. Cependant, il est bien rare que des travaux d'exploration mènent à l'ouverture formelle d'une mine, puisque le taux de succès de travaux d'explorations primaires est très faible. Il est estimé que moins d'une zone d'intérêt, soit une zone qui a présenté un indice, sur une proportion d'un sur dix mille conduit à l'aménagement d'une mine (Gouvernement du Canada, 2006). Ceci peut être expliqué par le fait que plusieurs échantillonnages peuvent être nécessaires avant que l'un d'entre eux certifie qu'une zone d'intérêt a été découverte (Gouvernement du Canada, 2006).

Les travaux d'exploration primaires causent peu de répercussions comparativement aux travaux d'exploration avancés. En effet, les travaux primaires se limitent à l'échantillonnage manuel des roches et à l'utilisation de petits appareils portatifs de forage alors que pour procéder à la caractérisation d'un gîte minéral, les entreprises doivent creuser des tranchées et procéder à des forages situés à des centaines de mètres de profondeur dans le sous-sol afin de recueillir des échantillons nécessaires à l'évaluation du potentiel minier (Gouvernement du Canada, 2006). Les impacts qui ont le plus de répercussions se produisent pendant les phases de l'exploitation et de la restauration. Ceux-ci sont abordés dans le chapitre 2.

2.2 Exploitation

L'exploitation consiste à produire des minéraux possédant une valeur économique en procédant à l'extraction de la roche du sous-sol pour en concentrer le minéral grâce à des procédés de transformation. Avant de procéder à l'ouverture d'une mine, des études environnementales et sociales doivent être complétées afin d'obtenir les permis nécessaires. C'est également à cette étape que le plan de fermeture de la mine est déposé. Une fois tous les plans déposés et les permis reçus, la construction de la mine peut alors débuter. Le site minier est d'abord aménagé et défriché, puis l'entreprise procède à la construction des bâtiments (Environnement Canada, 2011a). Ensuite, l'exploitation débute par le décapage de

la couche située à la surface du sol (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2011b).

Le processus permettant la concentration du minerai est très complexe et est schématisé à la figure 2.2. La concentration débute par l'extraction de la roche principalement par dynamitage qui permet par la suite de la déplacer vers la machinerie de concassage. C'est cette roche concassée qui contient le minerai, soit la substance recherchée, mais davantage de roches sans valeur nommées stériles (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2011b). Les stériles sont donc séparés de la roche contenant le minerai et sont remisés dans des lieux de stockage. La roche doit être très finement broyée pour obtenir le minerai concentré. Il faut ensuite séparer la matière utile des substances indésirables nommées résidus par l'utilisation de procédés mécaniques, physiques ou chimiques (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2011b). Ces résidus sont composés de métaux toxiques indésirables et de contaminants provenant de la roche excavée et de réactifs chimiques utilisés lors du broyage et de la flottation de la roche (Environmental Law Alliance Worldwide, 2011) pour ensuite être envoyés dans une seconde aire de stockage. Pour la transformation, le minerai concentré est souvent acheminé vers une usine de fusion située habituellement à l'extérieur du site minier (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2011b).

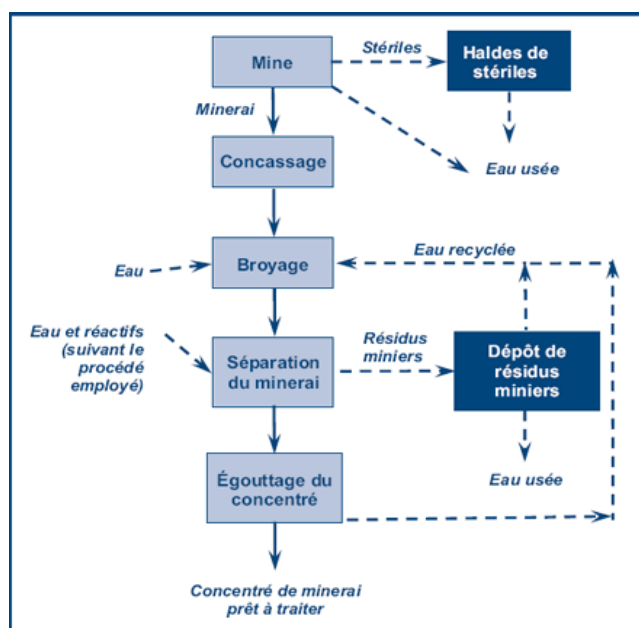


Figure 2.2 Étapes de la concentration du minerai

Source : Environnement Canada (2011a).

Due à la grande quantité de stériles, la gestion adéquate des rejets miniers est une partie importante du bon fonctionnement d'une mine. Par exemple, il est exigé que la teneur minimale en cuivre soit de 0,5 % afin de procéder à l'exploitation du minerai. Ainsi, pour chaque 5 tonnes de cuivres, 995 tonnes sont mises aux déblais (Braun, 2008). Puisque la grande majorité de la roche excavée n'est pas utilisée par les entreprises, il se crée une importante accumulation de rejets provenant des mines. D'abord, les stériles miniers et les morts-terrain, soit le sol recouvrant la roche, sont excavés et entreposés dans des haldes à stériles, soit des lieux de stockage de la matière indésirable (Génivar, 2009). Ensuite, la seconde portion des rejets est formée par les résidus provenant des concentrateurs nécessaires à la concentration du minerai. Ces résidus se composent de roches fragmentées finement, de l'eau, et de produits toxiques nécessaires au broyage, créant une espèce de boue de roches finement concassée (Génivar, 2009). Les entreprises stockent ces résidus miniers dans des parcs à résidus ou dans des bassins de polissages. Avant de les acheminer vers ces lieux, les résidus produits sont concentrés jusqu'à ce qu'ils deviennent plus épais et

forment une pulpe. Ceux-ci sont ensuite expédiés vers le parc à résidus minier (Génivar, 2009). Quant aux liquides extraits, ils sont dirigés vers le bassin de polissage. Cette installation permet aux fines particules de sédimenter au fond du bassin. Un drain peut également être installé pour permettre aux eaux de ruissellement du parc à résidus de s'écouler vers le bassin de polissage (Génivar, 2009). Ce sont donc des unités d'entreposage servant avant tout à empêcher la mobilisation et le dégagement de substances toxiques dans l'environnement.

Quant au Pérou, la majorité des rejets miniers sont entreposés dans des bassins pour éviter la contamination des milieux aquatiques avoisinants. Cependant, il arrive encore que des quantités importantes de rejets, qui peuvent atteindre 4 000 tonnes par jour, sont déversées directement dans les rivières ou dans la mer. Le principal défi est attribuable au profil topographique dans la région des Andes où sont réalisées les exploitations minières. En effet, les terrains escarpés sont un gros obstacle à l'acheminement du matériel de même que la construction de bassins de rétention. Cependant, d'autres pratiques sont également utilisées telles que le remplissage dans les fosses souterraines et la déshydratation des résidus et leur enfouissement (Ministerio de Energia y Minas, s.d.a).

2.2.1 Types d'exploitation de mines

Les types d'exploitation les plus communs sont la mine à ciel ouvert et la mine souterraine. La mine à ciel ouvert et la mine souterraine se différencient principalement par la manière dont la roche est excavée qui elle-même est influencée par la localisation du gîte minéral dans le sous-sol. La mine à ciel ouvert se décrit comme étant un immense bassin possédant des gradins qui sont creusés successivement au fur et à mesure que les couches de roches sont retirées (figure 2.3). Les entreprises optent pour ce type de mine lorsque le gisement se trouve relativement près de la surface du sol (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2011b). La mine souterraine est la mine la plus commune, mais également la plus complexe. Pour avoir accès au minerai, un système inter relié de tunnels est élaboré permettant d'y acheminer le personnel et les véhicules spécialisés via une rampe d'accès et

d'expédier le minerai extrait à la surface grâce à la présence de puits verticaux (figure 2.4). Les puits, qui sont reliés entre eux par des galeries, servent également au transport d'équipement et de machineries ainsi qu'à la circulation de l'air et à l'évacuation de l'eau. (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2011b). Les entreprises choisissent ce type d'exploitation lorsque le gîte minéral est situé trop profondément dans le sous-sol. Comparativement à la mine à ciel ouvert, la mine souterraine cause beaucoup moins de répercussions à l'environnement, puisqu'une superficie moins grande de sol ainsi qu'une quantité moins importante de roche ont besoin d'être excavées pour avoir accès à la substance minérale (Environmental Law Alliance Worldwide, 2011). Cependant, la qualité de l'eau souterraine et l'instabilité du sol du site minier souterrain peuvent être discutables une fois la mine fermée.

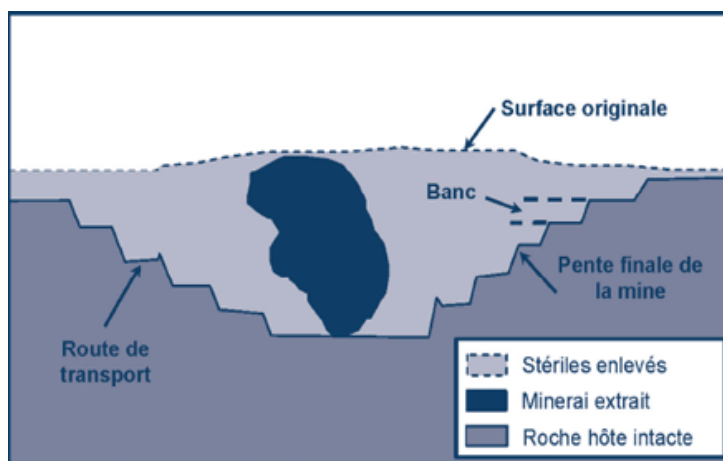


Figure 2.3 Mine à ciel ouvert

Source : Environnement Canada (2011a).

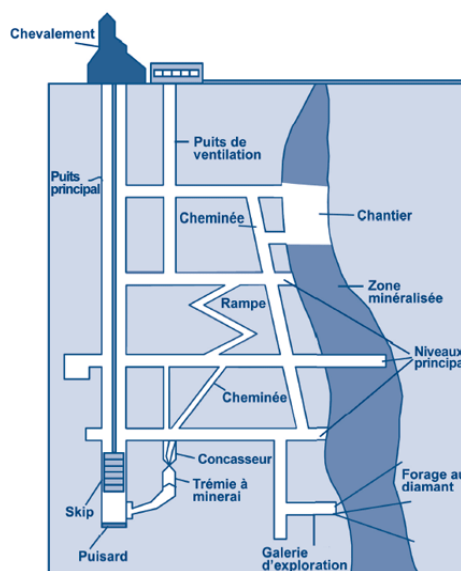


Figure 2.4 Mine souterraine

Source : Environnement Canada (2011a).

2.3 Fermeture et restauration

La restauration ou la fermeture d'une mine est la dernière étape du cycle minier. Puisque l'exploitation minière représente une utilisation temporaire des terres, il est la responsabilité de l'entreprise possédant le titre minier de s'assurer que la fermeture de la mine soit effectuée de façon ordonnée et respectueuse de l'environnement (Gouvernement du Canada, 2006). C'est pourquoi les écosystèmes qui ont été détruits doivent être reconstruits pour redonner au paysage une allure naturelle. Également, la restauration adéquate des mines permet d'éviter l'apparition de nouveaux sites miniers orphelins et de prévenir l'apparition de nouvelles sources de contamination des sols et des eaux. Pour assurer une prise en charge adéquate du site une fois l'extraction terminée par l'entreprise minière, un plan de restauration doit être déposé et approuvé par le gouvernement en plus d'être régulièrement mis à jour (Gouvernement du Canada, 2006). Ce plan doit être rédigé avant le début de l'exploitation et doit expliquer clairement la manière dont l'entreprise procédera au nettoyage et à la remise en état du site après la fin des travaux. Les obligations du plan de restauration touchent le démantèlement des structures, la gestion des résidus et des

déchets, l'élimination des produits chimiques et des hydrocarbures, le maintien de la stabilité des haldes de stériles, la fermeture des fosses et la revégétalisation complète des terres (Gouvernement du Canada, 2006).

Il existe plusieurs raisons pouvant expliquer la fermeture d'une mine. Les plus courantes sont expliquées par l'épuisement des réserves de minerai et par la baisse des prix des métaux et des minerais sur le marché international. Lorsqu'une chute importante survient, il n'est plus rentable pour l'entreprise de poursuivre l'extraction du minerai exploité qui implique qu'elle est souvent appelée à procéder à la fermeture du site lorsque cette situation se produit (United Nations Environment Programme, United Nations Development Program, Organization for Security and Co-operation in Europe et North Atlantic Treaty Organization, 2005). Il existe également des causes moins prévisibles telles que la modification ou la détérioration de la réserve géologique initialement prévue et d'autres plus rares comme des conditions environnementales, sociales ou politiques défavorables à la poursuite de l'extraction minière (United Nations Environment Programme, United Nations Development Program, Organization for Security and Co-operation in Europe et North Atlantic Treaty Organization, 2005).

La fermeture d'une mine inclut plusieurs étapes. D'abord, il y a la mise en service qui se caractérise par la mise à pied progressive de la majorité de travailleurs sur le site ainsi que l'examen final du plan de restauration (Gouvernement du Canada, 2006). Ensuite, le démantèlement est complété par des équipes qui se chargent de démonter toutes les installations et les équipements utilisés pour l'extraction et le traitement du minerai (Gouvernement du Canada, 2006). Après, la restauration consiste à remettre en état les écosystèmes perturbés bien souvent basés sur les caractéristiques que possédait le site avant d'être exploité (Gouvernement du Canada, 2006). La dernière étape de la fermeture d'une mine est la post-fermeture qui comprend la surveillance de la mise en place du plan de restauration et le suivi des travaux touchant le traitement des eaux contaminées et des installations de confinement des résidus (Gouvernement du Canada, 2006).

La restauration de sites miniers au Québec en soit, comporte communément la prise en charge de certains éléments. De plus en plus, pour les mines souterraines, une partie des stériles miniers est utilisée pour remblayer les cavités des puits et des galeries créées. En effet, du ciment est ajouté avant de les renvoyer sous terre. Cette action permet de solidifier le sol et de réduire la quantité de stériles accumulée dans le parc à résidus (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2011c). Le reste des stériles qui n'est pas utilisé pour le remblayage reste stocké dans les haldes à stériles convenues au départ. Des mesures doivent donc être mises en place pour éviter la percolation des eaux contaminées provenant de ces lieux d'entreposage pouvant causer de graves répercussions à l'environnement (Ministère des Ressources naturelles, 1997). Également, les digues des bassins de sédimentation et les structures de confinement du parc à résidus minier doivent être résistantes et imperméables pour ne pas se détériorer face aux conditions environnementales (Ministère des Ressources naturelles, 1997). Finalement, tout le site doit être mis en végétation incluant le lieu où se situaient les bâtiments, les parcs à résidus miniers, le bassin de polissage ainsi que les haldes à stériles et les sites d'enfouissement (Ministère des Ressources naturelles, 1997). Cette étape est primordiale afin de contrôler l'érosion des résidus et redonner au site un aspect naturel rendant ainsi le site dans un état visuellement acceptable pour la population et compenser pour les impacts environnementaux causés.

Au Pérou, les activités de fermeture de la mine dépendent généralement des conditions climatiques et environnementales de la localisation du site minier. Le Guide environnemental pour la fermeture et l'abandon de mines produit par le MINEM spécifie que ces activités doivent inclure la dérivation permanente des eaux superficielles autour des installations comme objectif de maintenir sous contrôle le ruissellement pendant les orages. Les aires affectées doivent être nivelées et végétalisées de façon appropriée. Les infrastructures construites doivent être de configuration stable ou les infrastructures doivent être retirées au moment de la fermeture. Les infiltrations et les décharges doivent être réduites concernant les mines souterraines et à ciel ouvert. De plus, les infiltrations des contaminants provenant des installations de rejets miniers doivent également être réduites (Ministerio de Energia y

Minas, s.d.b). Les autres exigences quant à la présentation du plan de fermeture sont décrites plus amplement au chapitre 3.

De plus, au Pérou, il existe des préoccupations différentes de celles du Québec sur la stabilité des infrastructures créées lors de l'exploitation minière. Le Pérou, situé dans les Andes, est un pays qui doit faire face à de fortes activités sismiques et à de fortes précipitations. Ainsi, toutes les infrastructures construites doivent pouvoir résister aux écroulements possibles dus aux tremblements de terre et aux inondations. Ainsi, des éboulements ainsi que la liquéfaction des résidus miniers sont toujours des dangers qui menacent la stabilité et la sécurité des infrastructures. De plus, étant donné la nature des gisements minéraux associée à la topographie, il y a un très gros risque de contamination par la lixiviation de substances toxiques au milieu environnant (Ministerio de Energia y Minas, s.d.b).

2.3.1 Définition de la restauration écologique

Il n'existe pas à l'heure actuelle de consensus sur la définition de la restauration écologique. Certains auteurs (Cooke et Johnson, 2002) affirment que la remise en état d'un site est un terme général qui désigne les travaux servant à redonner à la terre certains types d'utilisation du territoire après la fin de l'exploitation. Le terme restauration est plutôt utilisé dans les cas où la remise en état d'un site est basée sur des principes écologiques et qui promeut le rétablissement de l'intégrité écologique (Cooke et Johnson, 2002). Le remplacement désigne la construction d'un écosystème différent de celui présent au départ alors que la réhabilitation est plutôt le terme utilisé pour indiquer la progression vers le rétablissement de l'écosystème de départ (Cooke and Johnson, 2002). Selon la Society for Ecological Restoration International et Policy Working Group, la restauration écologique est le processus qui permet de soutenir le rétablissement d'un écosystème qui a été endommagé, détruit ou détérioré (Society for Ecological Restoration International et Policy Working Group, 2004).

Dans cet essai, la définition de la restauration écologique se réfère à la remise en état d'un site où le processus est basé sur des connaissances et des principes écologiques afin de redonner au site un aspect naturel. En d'autres mots, la restauration écologique d'un site minier signifie la reconstruction d'un écosystème à un état fonctionnel et de retrouver la dynamique de départ permettant l'interaction entre les organismes vivants et éléments abiotiques (énergie, eau, nutriments).

Il existe différents degrés d'actions en fonction de la sévérité des perturbations du site (figure 2.5). Pour les sites peu perturbés, seul le premier palier a besoin d'être appliqué soit de rehausser la valeur pour la conservation. Étant donné que les sites miniers sont des environnements où les écosystèmes ont été complètement détruits et les sols pas toujours conservés, ces lieux se retrouvent parmi les cas les plus critiques de la restauration écologique où les plus grands efforts doivent être déployés (Cooke et Johnson, 2002).

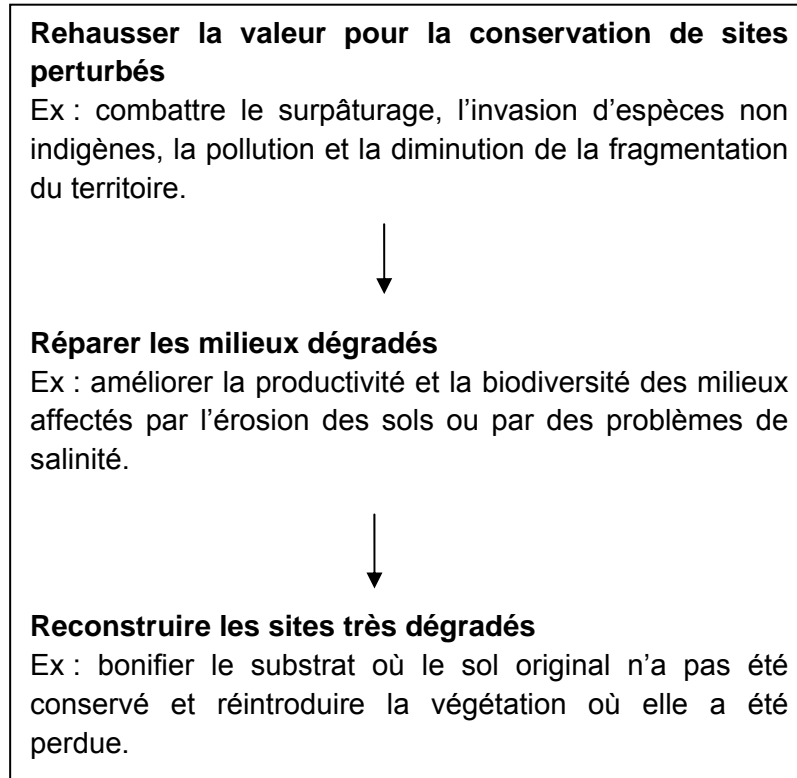


Figure 2.5 Continuum de la restauration écologique du rehaussement de la valeur pour la conservation à la reconstruction

Traduction libre

Source : Cooke, J.A. et Johnson, M.S. (2002)

2.3.2 Succession spontanée versus réhabilitation manuelle

Il existe deux approches pour procéder à la restauration d'un site. La première est la succession spontanée qui implique que les écosystèmes détruits se rétablissent naturellement grâce à la colonisation des espèces adjacentes au site (Prach et Hobbs, 2008). La seconde est la réhabilitation manuelle qui intègre plusieurs types d'interventions techniques pour redonner au site un aspect naturel (Prach et Hobbs, 2008). Selon la superficie et la cause de la destruction des écosystèmes, une approche en particulier peut être à privilégier.

La succession spontanée possède des avantages, mais ne peut être utilisée que lorsque le site à restaurer possède des conditions particulières, soit qui encouragent la colonisation naturelle par les plantes avoisinantes. En effet, cette méthode est très peu dispendieuse et il existe une certitude que les plantes qui coloniseront le site seront adaptées aux conditions environnementales pour permettre leur survie initiale. Cependant, cette approche peut demander beaucoup de temps pour atteindre les objectifs fixés au départ, surtout dans les cas où le site à coloniser est grand, ce qui limite le transport des propagules et lorsque la productivité potentielle du site est faible. Aussi, il y a moins de contrôle sur la sélection des espèces désirées (Prach et Hobbs, 2008). La succession spontanée est donc mieux adaptée pour les endroits possédant une faible superficie et où les conditions environnementales sont peu extrêmes et favorables, donc qui risquent peu de perturber la colonisation initiale des espèces pionnières. Comme les sites miniers présentent souvent des influences négatives telles que l'érosion et la contamination des eaux et du sol, il est recommandé d'utiliser l'approche de la réhabilitation manuelle. En effet, si aucuns travaux de jalonement ou d'amendement ne sont faits au sol, il est peu prévisible que le site se restaure naturellement, ou que la reprise des végétaux se réalise dans des délais jugés trop longs. Cependant, cette approche possède également des inconvénients. Il arrive que les plantes choisies pour végétaliser le site ne soient pas bien adaptées aux conditions environnementales qui se traduit par une faible croissance des végétaux, une mortalité élevée et une haute fréquence de l'apparition des pathogènes (Prach et Hobbs, 2008). Également, les sites restaurés

manuellement peuvent, selon les espèces choisies, produire des sites monotones et uniformes où la diversité structurelle et fonctionnelle est considérablement réduite comparativement à un site colonisé de façon naturelle (Prach et Hobbs, 2008). Finalement, il est vrai que la succession naturelle permet de réduire considérablement les coûts et les efforts, cependant, cette technique est peu adaptée aux conditions spécifiques retrouvées sur les sites miniers.

Chapitre 3

Impacts de l'exploitation et de la restauration d'un site minier

Les impacts attribuables à la phase d'exploitation et à celle de la restauration ont été divisés selon les impacts environnementaux et les impacts socio-économiques. Ensuite, la conclusion permet de faire un retour sur les éléments importants de ce chapitre et de mettre en évidence l'importance du rôle des entreprises minières. Les impacts spécifiques de la phase d'exploration n'ont pas été abordés, puisque ceux-ci sont beaucoup moins documentés dans la littérature comparativement à l'exploitation et à la restauration. Normalement, les impacts attribuables aux activités industrielles sont décrits dans les études d'impacts qui sont remises avant le début des travaux. Cette coutume est courante dans les pays développés, mais de plus en plus ces impacts sont également étudiés dans les pays en développement.

3.1 Impacts de l'exploitation

L'ouverture et l'exploitation d'une nouvelle mine causent d'abord des impacts environnementaux par la quantité de rejets produits et par la perturbation des écosystèmes notamment par la destruction de la végétation sur le site minier. Ensuite, cette phase entraîne également des impacts socio-économiques, autant positifs que négatifs, par l'arrivée de nouvelles sources de revenus et par les répercussions familiales et sociales.

3.1.1 Environnementaux

Les impacts environnementaux ont été structurés de la manière à présenter le drainage minier acide, l'érosion et la sédimentation des particules par l'eau et le vent ainsi que la

modification des habitats et les impacts sur la faune. Le degré de répercussion de ces impacts varie surtout selon le type d'exploitation de la mine et le minerai exploité.

3.1.1.1 Drainage minier acide

Le drainage minier acide (DMA) est probablement la menace la plus sérieuse et la plus fréquente dont les entreprises minières doivent faire face (Mining watch Canada, 2001). En plus du DMA, il existe le drainage minier alcalin et neutre, mais le drainage acide est le plus fréquent (Bussière *et al.*, 2005). Malgré que le drainage acide soit un processus naturel, en contexte minier il est appelé DMA et peut causer des répercussions catastrophiques. En effet, il provient de l'oxydation des minéraux sulfurés contenus dans certains types de roches qui entrent en contact avec l'eau et l'air et ensemble produisent l'acide sulfurique. En contexte d'exploitation minière, cette réaction est multipliée étant donné la très grande quantité de roche excavée causant l'acide sulfurique à être générée pendant plusieurs années après la fermeture de la mine. Lorsque le problème n'est pas contrôlé, cet acide se déverse directement dans l'environnement et affecte les milieux terrestres et ceux aquatiques par ruissellement affectant directement la qualité des eaux ainsi que la vie aquatique (British Columbia Wild and Environmental Mining Council of British Columbia, 2006). De plus, lorsque le pH d'une eau diminue, comme dans le cas du DMA, certains métaux (aluminium, arsenic, cobalt, cuivre, cadmium, plomb, argent, zinc) deviennent plus solubles, mais également plus nocifs (Leblanc, 1982) puisqu'à très grandes concentrations, ces métaux deviennent toxiques pour la plupart des organismes aquatiques (Mining watch Canada, 2001). Les DL50 moyennes pour 3 espèces qui ont été prises 4 jours après leur éclosion sont présentées au tableau 3.1

Tableau 3.1 Concentrations moyennes létales pour le crapaud (*Gastrophryne carolinensis*), la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) et le poisson rouge (*Carassius auratus*)

Métaux	DL50 (ppm)*
Arsenic	0,36
Cobalt	0,29
Cuivre	1,78
Cadmium	0,11
Plomb	0,62
Argent	0,02
Zinc	1,2

* DL50 : la concentration qui provoque la mort chez 50 % des individus

Traduction libre

Source : Northeastern Research Center for Wildlife Diseases, Registry of Comparative Pathology et Institute of laboratory Animal Resources (1979)

Ainsi, le DMA peut provenir de n'importe quelle partie de la mine où des minéraux sulfurés sont exposés à l'air et à l'eau, soit les bassins de polissage, les haldes à stériles, le parc à résidus, les sites d'enfouissement et l'équipement servant à transporter les résidus de la mine aux sites d'entreposage (Environmental Law Alliance Worldwide, 2011). C'est pourquoi il faut s'assurer que ces structures de confinement sont sécuritaires, résistantes et durables pour éviter de voir apparaître cette problématique.

Le DMA peut s'atténuer de façon naturelle due à la modification des conditions hydrogéologiques ou à l'épuisement des sources de sulfures. Cependant, il peut nécessiter plusieurs dizaines à plusieurs centaines d'années avant de voir s'estomper la production d'acidité. C'est pourquoi il est important d'adresser le problème, malgré qu'il peut s'avérer être très coûteux et laborieux. Les deux grands types de traitements sont les traitements actifs et passifs. Les traitements actifs ont pour objectif de traiter localement le drainage

acide avec des produits chimiques servant à neutraliser l'acidité des effluents. Ces produits peuvent être, par exemple, de la chaux qui est utilisée pour faire augmenter le pH. Les traitements passifs ont également comme but de neutraliser le pH, mais en se servant de réactions chimiques, biologiques et physiques qui existent à l'état naturel dans l'environnement. En effet, cette méthode durable à long terme consiste à acheminer les eaux de lixiviation vers des systèmes qui modifient les propriétés de l'effluent par l'utilisation de bactéries aérobiques et anaérobiques qui déclenchent des réactions catalysées (Melanson, 2006). L'objectif principal de ces méthodes est donc la neutralisation de l'acidité, la précipitation des métaux lourds et l'élimination des matières en suspension (López Pamo *et al.*, 2002).

Malgré que le DMA soit une source mondiale de pollution, les méthodes présentées ne font que contrôler le problème. Il n'existe pas à l'heure actuelle de solution miracle pour éradiquer cette problématique à long terme (Melanson, 2006).

3.1.1.2 Érosion et sédimentation

Les résidus miniers sont formés de particules de plusieurs tailles, mais celles étant les plus fines sont les plus sujettes à l'érosion et également à l'origine d'une possible contamination. Ces particules fines, dont la taille varie entre 0,05 et 0,25 mm, sont très facilement transportées par le vent ou déplacées par ruissellement (Leblanc, 1982). Ainsi, ces particules sont dommageables, car elles sont formées par des débris du sol, mais également par des roches qui contiennent des métaux lourds et par des produits toxiques utilisés sur les sites miniers.

Une fois ces particules mises en suspension dans l'air, elles voyagent vers l'atmosphère et se déposent ensuite vers des plans d'eau proches ou sur des terres avoisinantes. Dans les milieux aquatiques, celles-ci se déposent en bordure des cours d'eau, dans le lit des rivières ou restent suspendues dans les eaux libres (British Columbia Wild and Environmental Mining Council of British Columbia, 2006). Cette accumulation cause plusieurs répercussions

notamment sur la qualité de l'air et la contamination des sols et des cours d'eau en plus d'affecter à long terme les organismes et espèces terrestres et aquatiques. En effet, les particules peuvent affecter les fonctions respiratoires des espèces terrestres et au niveau aquatique, l'augmentation de la turbidité et de la sédimentation réduisent la quantité de lumière qui atteint le lit des cours d'eau et affectent la croissance des macrophytes et autres plantes aquatiques (Mining watch Canada, 2001). Également, les métaux lourds et autres produits toxiques qui ne sont pas dégradés dans l'environnement constituent une source de contamination à long terme (Olivier, 2009).

Plusieurs activités sont responsables de l'instabilité des sols tels que la construction de routes et d'infrastructures, la préparation du site minier et les processus de concassage et de broyage de la roche. La production de poussière est donc une importante source de contamination de l'air et de l'atmosphère. Celle-ci dépend largement des conditions climatiques et des mesures de contrôle, car la contamination de l'air est davantage présente dans les régions arides (Warhust, 1994).

3.1.1.3 Modification des habitats et impacts sur la faune

Plusieurs interventions, se déroulant durant l'exploitation minière, affectent négativement les habitats et les espèces fauniques. D'abord, la construction de routes servant à acheminer le matériel et les employés, fragmente considérablement le territoire. Cette conséquence a pour effet de modifier des portions de territoire en plus petites et d'isoler certains fragments du territoire (European Environment Agency et Swiss Federal Office for the Environment, 2011). Ce morcellement peut altérer le déplacement des espèces entre les parcelles et même conduire au déclin de certaines d'entre elles. Parfois même les routes facilitent le déplacement des prédateurs qui peut menacer le maintien de certaines populations (Environmental Law Alliance Worldwide, 2011). De plus, pour avoir accès au minerai et prévoir des sites d'entrepôts des résidus, une grande portion de terres doit être déboisée pour permettre la construction d'infrastructures. L'effet le plus direct sur la faune est le déplacement et la destruction des espèces fauniques du site d'exploitation et des lieux d'accumulation des déchets. Les espèces mobiles sont capables de se déplacer, mais les

espèces plus sédentaires tels les invertébrés, les petits mammifères et reptiles sont plus sévèrement touchés. De plus, les perturbations attribuables à la déforestation et aux bruits de la machinerie affectent les sites de nidifications de certaines espèces d'oiseaux (Environmental Law Alliance Worldwide, 2011).

Cependant, les impacts les plus importants, sont ceux affectant les organismes et habitats aquatiques. En effet, les poissons sont étroitement affectés par l'augmentation de la turbidité et des contaminants dans les cours d'eau, puisque la présence de sédiments affecte leurs pratiques alimentaires, en réduisant leur visibilité, et peut les rendre plus vulnérables aux pathogènes en s'attaquant à leurs branchies et en interférant avec la production de mucus (Environnement Canada, 2011b). Les contaminants, tels que les métaux, peuvent affecter les poissons de différentes façons notamment en causant des répercussions au niveau de la croissance et de la reproduction et même provoquer la léthargie et la mort (Environmental Law Alliance Worldwide, 2011). De plus, l'accumulation des particules provenant de l'érosion cause plusieurs répercussions notamment au niveau de l'altération des habitats aquatiques, des lieux de frai ainsi que de la perte de stockage des plans d'eau (British Columbia Wild and Environmental Mining Council of British Columbia, 2006). Le dépôt de sédiments cause le recouvrement des petites fosses et cavités pouvant potentiellement contenir des œufs (Pêches et Océans Canada, 2010). Également, la formation de DMA entraîne la baisse du pH de l'eau et cause la réduction des populations de poissons et autres espèces aquatiques en tuant les individus qui ne sont pas tolérants à une eau aussi acide. Le tableau 3.2 montre le niveau de pH que certaines espèces sont en mesure de tolérer.

Tableau 3.2 Valeurs de pH minimales tolérables par différentes espèces aquatiques

Espèces	pH
Truite (<i>Onchorynchus ssp.</i>)	5,0
Achigan (<i>Micropterus ssp.</i>)	5,5
Perchaude (<i>Perca ssp.</i>)	4,5
Grenouille (<i>Rana ssp.</i>)	4,0
Salamandre (<i>Salamandra ssp.</i>)	5,0
Palourde (<i>Ruditapes ssp.</i>)	6,0
Écrevisse (<i>Orconectes ssp.</i>)	5,5

Traduction libre

Source : Environmental Protection Agency (2008)

Tel que mentionné précédemment, la hausse de l'acidité augmente la mobilité et la toxicité des métaux lourds et ceux-ci sont problématiques, puisqu'ils se déposent dans le lit des rivières et constituent une source de contamination à long terme. (British Columbia Wild and Environmental Mining Council of British Columbia, 2006).

3.1.2 Sociaux et économiques

Contrairement aux impacts environnementaux, les impacts socio-économiques impliquent également des répercussions positives. En effet, l'ouverture d'une nouvelle mine est très bénéfique pour une région, car elle apporte de l'emploi et de nouvelles sources de revenus pour les habitants. C'est également avantageux, puisque l'entreprise minière offre des possibilités de formation et de développement des compétences chez les travailleurs ainsi que l'apprentissage de nouveaux métiers et de connaissances (World Bank et International Finance Corporation, 2002). Conséquemment, il se crée une augmentation de la prospérité

économique de la région, soit par l'augmentation du pouvoir d'achat, qui encourage l'économie des entreprises locales. Il peut également s'avérer être une excellente opportunité pour l'entreprise minière de créer des partenariats locaux. De plus, les taxes et redevances payées par les entreprises minières au gouvernement peuvent servir à réinvestir dans des domaines publics tels que l'éducation et la santé, qui s'avère être bénéfique pour toute la communauté (World Bank et International Finance Corporation, 2002).

Cependant, la construction d'une mine peut également causer des répercussions négatives surtout au niveau social à plusieurs niveaux. Premièrement, l'ouverture d'une nouvelle mine implique l'arrivée de nouveaux travailleurs dans une région. Ces travailleurs sont alors souvent obligés de quitter leurs familles pendant des semaines et parfois des mois et de laisser leur conjointe à elle-même pour s'occuper des enfants et des tâches ménagères. (World Bank et International Finance Corporation, 2002). Ainsi, cet éloignement prolongé peut être à l'origine de tensions familiales.

Deuxièmement, l'arrivée massive de nouveaux travailleurs crée une forte immigration, donc une augmentation de la population. (Gouvernement du Canada, 2006). Si cette augmentation est trop subite, il en résulte une augmentation des pressions sur les ressources et peut mener à plusieurs problèmes sanitaires (Environmental Law Alliance Worldwide, 2011). Du fait que plusieurs communautés sont en relation étroite avec les ressources naturelles, l'exploitation d'une nouvelle mine peut avoir des conséquences sur la santé des habitants et des employés si aucune mesure préventive n'est appliquée. Selon la concentration de certaines substances toxiques, il peut y avoir des répercussions graves sur la santé publique telles que l'augmentation de la mortalité et de certaines maladies graves. Ces problèmes regroupent, par exemple, des cancers du poumon, lorsqu'en contact avec des composés d'arsenic, de nickel ou d'aluminium. De plus, l'exposition à l'aluminium peut causer des pathologies, comme des cancers de la vessie, ainsi que des problèmes asthmatiques (Donoghue, 2004). Aussi, une contamination non contrôlée peut même affecter d'autres activités économiques comme l'agriculture et la pêche (Environmental Law Alliance Worldwide, 2011).

Dans les régions arides, il y a un risque plus grand de contamination de l'air par les particules de matières, provenant des résidus miniers, possédant des diamètres plus petits que 10 microns (PM_{10}) et plus petits que 2,5 microns ($PM_{2,5}$). Une fois respirées, ces particules peuvent causer de grandes incidences sur la santé telle que des problèmes respiratoires et des maladies cardio-vasculaires. Les PM_{10} et $PM_{2,5}$ ont récemment commencé à être mesurés dans certains pays, mais ne sont pas suivi sur les sites miniers abandonnés, malgré le risque de problèmes de santé attribuables et la proximité de ces sites à des populations humaines (Mendez et Maier, 2008a).

Finalement, l'installation d'une nouvelle mine peut affecter considérablement les communautés déjà présentes au départ. En effet, une mine peut modifier les utilisations traditionnelles du territoire et affecter les activités ancestrales telles que les activités de subsistance et perturber des lieux patrimoniaux et sacrés en modifiant largement le paysage (Environmental Law Alliance Worldwide, 2011). De plus, il arrive que les entreprises minières ne respectent pas les droits humains des habitants en ne compensent pas de manière juste les communautés locales. Cette situation peut alors mener à des tensions sociales importantes et être la cause de conflits majeurs (Environmental Law Alliance Worldwide, 2011).

3.2 Impacts de la fermeture et de la restauration

Tout comme la phase d'exploitation, la restauration implique des impacts environnementaux et socio-économiques. Malgré qu'il existe des répercussions environnementales négatives, seuls les gains ou retombées positives environnementales sont abordées. Ensuite, les impacts négatifs et positifs des impacts sociaux et économiques sont décrits.

3.2.1 Environnementaux

La restauration apporte beaucoup de bénéfices environnementaux, puisqu'elle permet d'atténuer la majorité des impacts négatifs causés par l'exploitation. Ces bénéfices environnementaux sont l'amélioration visuelle du paysage par l'embellissement de

l'environnement et le nivellement du territoire (Bradshaw et Chadwick, 1980). Le but premier de la restauration est l'amélioration générale de la qualité de l'environnement et peut également favoriser une augmentation des habitats fauniques, de la biodiversité, du couvert forestier, etc. Il est clair que plusieurs années sont souvent nécessaires pour atteindre les buts fixés, mais la restauration permet de retrouver beaucoup plus rapidement la dynamique écologique présente au départ comparativement à un site laissé à lui-même (Prach et Hobbs, 2008).

3.2.1.1 Bénéfices de l'utilisation des végétaux

Ainsi, plusieurs répercussions environnementales positives sont causées par la restauration et lorsque des végétaux sont utilisés pour remettre en état un site, des gains environnementaux encore plus importants sont tirés. En effet, l'apport d'un couvert végétal est extrêmement profitable, car il joue un rôle au niveau de la stabilisation des sols et de la contamination du cycle hydrologique. La plantation de végétaux évite l'érosion de fines particules et, conséquemment, que celles-ci soient transportées vers d'autres milieux et causer la contamination des eaux de surface de milieux avoisinants (Tordoff et *al.*, 2000). De plus, la croissance des plantes contribue à la production de substrat, car les végétaux sont capables de modifier les propriétés du sol. Lorsque les végétaux meurent, leur décomposition contribue à l'apport de nutriments et de matière organique essentiels à la croissance des nouveaux végétaux. Également, les plantes de types légumineux sont capables de fixer l'azote atmosphérique dans le sol grâce à des bactéries de type *Rhizobium* (Bradshaw, 2000). De plus grandes quantités d'eau sont retenues dans le sol réduisant ainsi le ruissellement vers les cours d'eau et l'infiltration vers la nappe phréatique. Alors, une quantité moins grande de contaminants pollue les eaux de surface et souterraines (The Pennsylvania Department of Environmental Protection, 1998). La végétation permet de reconstruire les écosystèmes détruits, de restructurer le substrat et d'améliorer la diversité physique et biologique de sites perturbés (Tripathi et Singh, 2008). En rétablissant les communautés végétales présentes avant le début des activités, il est également possible de contribuer à la

conservation locale et régionale de certaines espèces en recréant les habitats naturels ainsi que les corridors migratoires (Government of Queensland, 1995).

Malgré la présence d'une couverture végétale, certains sites miniers peuvent quand même être générateurs de DMA. C'est pourquoi il faut éviter l'infiltration d'oxygène et d'eau, et ultimement leur contact avec les résidus miniers. Lorsque cette situation se produit, ces sites doivent être suivis de très près et adressés selon la solution la plus adaptée en fonction du contexte. Heureusement, il existe différentes méthodes d'entreposage des résidus miniers qui visent à minimiser l'infiltration de l'eau et de l'air sur les matériaux sulfuriques.

3.2.2 Sociaux et économiques

Lors de la fermeture d'une mine, plusieurs des bénéfices apportés par l'exploitation de celle-ci, sont retirés lors de la fermeture et peuvent causer des répercussions à long terme sur les communautés locales. D'abord, la mise à pied des employés entraîne des répercussions directes et indirectes sur les emplois, les partenariats, la vente de biens et de services au niveau local. Conséquemment, il se crée une diminution importante du revenu et du pouvoir d'achat pour les familles et les communautés (Gouvernement du Canada, 2006). Lorsque la mine constitue la source principale de revenue, d'embauche et de services, les impacts auront d'autant plus d'impact sur le bien-être de la communauté. (World Bank et International Finance Corporation, 2002). Ce constat est souvent observé dans les pays en développement où les sources alternatives d'économies sont limitées (World Bank et International Finance Corporation, 2002).

Ensuite, la restauration implique des répercussions positives, car elle permet de retrouver certains types d'occupation du territoire et de poursuivre la pratique d'activités culturelles chez les communautés locales (Bradshaw et Chadwick, 1980). En plus, la restauration promeut le développement durable en assurant aux générations futures de pouvoir profiter d'un environnement sain sans avoir à subir les impacts négatifs des anciens sites miniers qui n'ont pas été restaurés. Également, les communautés peuvent bénéficier des infrastructures

non démontées par les entreprises pour les convertir en édifices publics, par exemple, en hôpitaux ou en écoles (World Bank et International Finance Corporation, 2002).

3.3 Conclusion

Pour conclure, l'ouverture, l'exploitation et la fermeture d'une mine causent des impacts multiples autant sur les plans environnementaux, sociaux, qu'économiques. Tel que mentionné, la restauration a pour but de contrer les impacts environnementaux de la phase d'exploitation et ces impacts sont les plus considérables lorsque les mines sont situées dans des endroits qui n'ont jamais été perturbés.

En prenant exemple sur les pays développés, les pays en développement prennent davantage conscience de l'importance de prévenir les impacts décrits avant que ceux-ci se produisent. Ainsi, il est possible d'économiser par rapport aux coûts associés à la prise en charge des impacts pouvant survenir et également de prévenir l'apparition de ceux-ci pendant et après les opérations minières (Ministerio de Energia y Minas, s.d.b). De plus, le degré de répercussion des impacts négatifs varie surtout selon la mise en œuvre de mesures d'atténuation pour contrer les conséquences possibles. Malgré le fait qu'il peut être relativement facile d'identifier les différents types d'impacts, les difficultés surviennent lorsqu'il faut trouver des solutions techniques faisables en fonction des ressources financières disponibles.

Chapitre 4

Contexte de la législation et des obligations concernant la restauration

La législation servant à réglementer l'extraction minière et la protection de l'environnement est extrêmement importante afin d'établir un encadrement adéquat et de guider les entreprises minières dans leurs démarches concernant la restauration de sites miniers. Dans les pays développés, les textes de loi sont généralement beaucoup plus exhaustifs et contraignants pour les entreprises qui exercent l'extraction minière comparativement aux pays en développement. Cependant, beaucoup de pays en développement ont pris conscience de ce constat, et plusieurs ont entrepris des démarches concrètes afin de remédier à cette situation. Ce chapitre aborde dans un premier temps, les généralités retrouvées dans les pays développés quant au contexte législatif entourant la restauration et ensuite, les obligations législatives du Québec. Dans un deuxième temps, les généralités des pays en développement sont abordées et suivies par les exigences concernant la restauration des sites miniers au Pérou. Le chapitre se termine par une synthèse qui rappelle les éléments importants abordés.

4.1 Généralités des pays développés

Les pays développés possèdent des ressemblances quant à la prise en charge de la fermeture des mines dans leur législation qui se distinguent des pays en développement. D'abord, l'encadrement législatif des activités minières d'exploitation et de restauration est, dans la plupart des cas, la responsabilité des paliers inférieurs ou secondaires du gouvernement. Ainsi au Canada, cette juridiction revient à la responsabilité des provinces (Clark et Clark, 2005). Ensuite, tous les pays développés possèdent une législation exhaustive qui répercute directement ou indirectement la fermeture et la restauration des sites miniers. Cette législation peut faire références à des lois, des règlements, des

politiques, ou même à des lignes directrices, pour s'assurer que les entreprises respectent les exigences gouvernementales concernant la fermeture adéquate de sites miniers (Clark et Clark, 2005). De plus, dans la législation des pays développés, il existe toujours des mesures assurant que des garanties financières seront disponibles lors de la fermeture du site pour financer les travaux nécessaires à la restauration complète et éviter que ces sites ne soient sous la responsabilité de l'État. Ainsi, si une entreprise traverse une crise financière et procède à la fermeture du site plus rapidement que prévu des garanties sont disponibles pour effectuer la restauration. De plus, avant d'entreprendre toutes activités minières, les entreprises doivent déposer une étude d'impacts dressant la liste des impacts assurés et potentiels, autant ceux environnementaux que sociaux, causés par les différents types d'activités. Finalement, dans presque la majorité des cas, la législation attribue une importance particulière aux communautés indigènes et autochtones pour que ceux-ci soient inclus dans toutes les étapes du développement minier (Clark et Clark, 2005).

4.2 Cas du Québec

Le Québec est été choisi pour représenter concrètement les similarités entre les pays développés. D'abord, les lois et règlements relatifs à la restauration de sites miniers sont exhaustifs et couvrent tous les aspects importants. Ensuite, il existe une entente particulière soit la Convention de la Baie-James et du Nord québécois pour encadrer les projets touchant les communautés autochtones habitant la région de la Baie-James. En ce qui concerne les processus de consultation pour les projets touchant le sud de la province le BAPE, soit le Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, est l'organisme qui possède le mandat de les orchestrer (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 2012). Avec l'arrivée du Plan Nord, plusieurs grands chantiers miniers verront le jour dans la partie nordique de la province, le BAPE sera donc beaucoup moins impliqué dans la consultation pour ces types de projets. Cette section se termine avec une introduction au guide réalisé par le Ministère de l'Environnement et de la Faune servant à informer les entreprises des éléments importants que doit contenir le plan de fermeture d'un site minier. C'est dans ce guide que les exigences en matière de végétalisation sont expliquées.

4.2.1 Lois et règlements applicables

La Loi qui affecte directement les exigences en matière d'activités minières est la *Loi sur les mines* ainsi que son règlement correspondant applicable à l'exploitation minière soit le *Règlement sur les substances minérales autres que le pétrole, le gaz naturel et la saumure*. La *Loi sur la qualité de l'environnement* est celle qui oblige les entreprises à la procédure d'évaluation et d'examen pour les projets miniers, puisqu'ils font partie de la liste des projets qui sont obligatoirement assujettis. Il existe également la Directive 019 qui est utilisée pour l'analyse de projets miniers en regard à la délivrance du certificat d'autorisation au niveau provincial.

La *Loi sur les mines* légifère les droits et les obligations des titulaires de droits miniers ou entreprises minières pour les activités d'exploration, d'exploitation et de restauration. C'est donc grâce à ces dispositions que les entreprises doivent obligatoirement remettre dans un état satisfaisant les lieux touchés par les activités. La définition d'un état satisfaisant se retrouve dans le guide servant à la rédaction du plan de restauration. Ainsi, cette loi aborde de manière spécifique les mesures de protection et de restauration des sites. Les titulaires de droits miniers sont dans l'obligation de faire valider un plan de restauration avant le début de l'exploitation. Les modalités entourant la rédaction de ce plan sont également explicitées. Notamment, le plan doit aborder la gestion des résidus miniers et leurs méthodes de confinement pour éviter toutes formes de dommages environnementaux. Ce plan doit également contenir les étapes de réalisation des travaux jusqu'à la cessation définitive des travaux d'exploitation ainsi qu'une évaluation des coûts anticipés. La loi exige que le plan de restauration doit fournir une description d'une garantie pour certifier que la somme nécessaire à l'exécution des travaux de restauration soit amassée au moment de la fermeture. Le *Règlement sur les substances minérales autres que le pétrole, le gaz naturel et la saumure* explique les normes concernant la forme, le montant, le nombre de versements, et les conditions de la garantie selon la durée des travaux. Également, il indique les travaux assujettis au plan de restauration, selon si les travaux ont lieu pendant l'exploration ou l'exploitation. Depuis 1995, les entreprises minières sont obligées de fournir 70 % de

l'évaluation des coûts anticipés pour la réalisation des travaux de restauration et de réaménagement des aires d'accumulation. Actuellement, il existe un projet de réforme à la *Loi sur les mines*, soit le projet de Loi 14 afin d'augmenter à 100 % le dépôt des coûts anticipés associés à la fermeture et à la restauration des sites miniers (Assemblée nationale, 2011).

La *Loi sur la qualité de l'environnement* est la loi générale applicable à tous qui stipule que nul n'a le droit de polluer ou tout simplement de nuire à la qualité de l'environnement. Tel que mentionné précédemment, la *Loi sur la qualité de l'environnement* oblige tout projet minier, y compris l'agrandissement, la transformation ou la modification d'une exploitation minière existante à la procédure d'évaluation des impacts.

La Directive 019 est un outil supplémentaire utilisé pour analyser la délivrance de certificats d'autorisation en vertu de la *Loi sur la qualité de l'environnement* pour les projets miniers. De plus, il est utilisé pour les projets assujettis à la procédure d'évaluation et d'examen des impacts et les projets situés sur le territoire délimité par la Convention de la Baie-James et du Nord québécois. Cette directive stipule les exigences spécifiques qu'en à la protection des eaux et encadre la gestion des eaux usées en plus des exigences générales qui touchent le suivi environnemental en post-exploitation et post-restauration des résidus miniers (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2005).

4.2.2 Convention de la Baie-James et du Nord québécois

La Convention de la Baie-James et du Nord québécois (Convention de la Baie-James et du Nord québécois 1975) est une entente signée en 1975 entre le gouvernement du Québec et les représentants des Cris et des Inuits, soit les communautés autochtones de la région visée par le territoire de la Baie-James et du Nunavik (Agence canadienne d'évaluation environnementale, 2011). Cette entente permet l'implication directe des communautés autochtones dans les négociations sur les projets affectant leur territoire. Elle est d'ailleurs la première convention du genre stipulant les revendications territoriales au Canada. Cette convention est extrêmement importante, car elle vise les communautés résidentes ou

utilisant un territoire d'un million de km², soit plus des deux tiers de la superficie du Québec (Agence canadienne d'évaluation environnementale, 2011). Cette convention a vu le jour lorsque le gouvernement a annoncé la construction de projets hydro-électriques sur une section du territoire utilisée par les communautés Cris. Pendant la durée des travaux, leurs droits ont été totalement ignorés, ce qui a mené à la rédaction de la convention. Elle explique la manière dont le territoire a été divisé selon les catégories de terres et définit les droits des autochtones quant aux activités de chasse et de pêche. Également, la convention a également permis d'établir les régimes définissant les relations futures entre les autochtones et les gouvernements pour les projets touchant leur territoire (Société Makivik, 2011). C'est pourquoi, notamment en ce qui concerne les projets miniers se déroulant en territoire autochtone, les entreprises sont dans l'obligation de développer des ententes de compensation pour les communautés touchées, d'adhérer à des processus de participation publique et de déposer des études d'impacts de type environnemental et social.

4.2.3 Guide et modalités de préparation du plan et exigences générales en matière de restauration des sites miniers au Québec

Pour renseigner les entreprises minières dans leurs démarches en matière de restauration, le Ministère de l'Environnement et de la Faune ainsi que le Ministère des Ressources naturelles ont rédigé un guide en 1997 pour les accompagner lors de leur rédaction du plan de restauration (Ministère des Ressources naturelles, 1997). Ce guide est d'ailleurs appelé « Guide et modalités de préparation de plan et exigences générales en matière de restauration des sites miniers au Québec » (Ministère des Ressources naturelles et le Ministère de l'Environnement et de la Faune, 1997). Il permet de rappeler aux personnes visées les obligations de la *Loi sur les mines* concernant les substances minérales, les obligations quant au contenu du plan de restauration et les exigences administratives liées à la délivrance de ce plan. C'est dans ce guide que l'on retrouve les exigences quant à la définition de l'état satisfaisant d'un lieu ainsi que les obligations concernant la végétalisation.

Selon le guide, la définition de l'état satisfaisant se divise en quatre points. Le premier point dicte que les risques inacceptables pour la santé doivent être éliminés et que la sécurité des personnes doit être assurée. Le second, de limiter la production et la propagation de substances susceptibles de porter atteinte au milieu récepteur et, à long terme, d'éliminer toute forme d'entretien et de suivi des mesures de restauration mises en place. Le troisième point vise à redonner un site une allure visuellement acceptable pour la collectivité et le dernier point, de remettre le site des infrastructures (en excluant les aires d'accumulation) dans un état compatible avec l'usage futur.

4.2.3.1 Exigences en matière de végétalisation

Le guide aborde une courte section sur les exigences concernant la mise en végétation du site. Ainsi, tous les terrains affectés par l'activité minière (le site des bâtiments, le parc à résidus miniers, les bassins de polissage, les haldes à stériles, etc.) doivent être recouverts par de la végétation dans un but de contrôler l'érosion et redonner au site un aspect naturel. Il est également indiqué que le terrain doit être scarifié et amendé si nécessaire. Les dépôts meubles et les sols doivent aussi être conservés sur plusieurs haldes, car lors de la restauration, ce sont ces sols qui sont utilisés pour la restauration. Aussi, les caractéristiques de la végétation doivent être comparables à celles de la végétation du milieu environnant. La végétation doit également être autosuffisante six ans après son implantation et à ce stade, aucun amendement ne doit être nécessaire pour en assurer son maintien.

4.3 Généralités des pays en développement

En comparaison avec la législation des pays développés, celle des pays en développement concernant l'extraction des ressources naturelles est beaucoup moins contraignante. Ainsi, les entreprises sont donc moins incitées à se soucier des impacts environnementaux et sociaux. Cependant, leur législation n'est souvent pas assez explicite et détaillée qui confère aux entreprises une plus large latitude concernant les exigences demandées. Parfois même, certains pays n'abordent même pas la nécessité de restaurer un site, une fois l'extraction

terminée dans leur législation comme le Chili, le Zimbabwe et le Myanmar (Clark et Clark, 2005). Ceux abordant la restauration dans leur législation, leurs lois et leurs règlements en vigueur sont souvent trop généraux pour permettre une réelle applicabilité et un suivi efficace des mesures demandées. Malheureusement, les gouvernements ont de la difficulté à les rendre plus contraignants vu un manque de ressources financières et techniques.

La spécificité des dispositions dans la loi dépend de plusieurs facteurs, notamment de l'ancienneté de la législation régulant l'extraction minière, l'historique des activités menées par d'anciennes entreprises ainsi que la législation liée à la protection de l'environnement. En effet, la protection de l'environnement et l'extraction minière sont des termes qui n'étaient pas anciennement jumelés. Ce sont donc seulement les lois régissant l'extraction minière qui ont été mise à jour récemment qui intègrent ces concepts (Clark and Clark, 2005). De plus, la majorité des lois plus anciennes portant sur l'exploitation minière, les enjeux entourant la fermeture et la restauration des mines, sont abordés seulement de manière générale. Malgré que plusieurs de ces textes législatifs ont été mis à jour récemment, il n'en reste que plusieurs d'entre eux sont incomplets et ne traite pas en profondeur la fermeture responsable de sites miniers (Clark et Clark, 2005). De plus, comparativement aux pays développés, les garanties financières servant à financer les travaux de restauration ne sont pas exigées ou ne couvrent qu'une faible partie des coûts encourus (Clark et Clark, 2005).

4.4 Cas du Pérou

Le Pérou, considéré un pays en développement, est un pays qui ressemble au Québec, car lui aussi détient un grand historique d'extraction minière qui s'est souvent déroulé à proximité de communautés rurales et indigènes (Garcia, 2008). Le Pérou, comme bien des pays en développement, accusait un retard par rapport à certains pays développés concernant leur législation traitant de la restauration de sites miniers. Cependant, au cours de la dernière décennie, beaucoup de changements se sont déroulés qui ont permis au pays de moderniser sa législation. Ainsi, en 2003, le Pérou a adopté la *Ley qui regula el cierre de minas*, et son règlement correspondant le *Reglamento para el cierre de mina*. Cette nouvelle loi inclut les

méthodes de restauration, une estimation des coûts de fermeture, des méthodes de contrôle et de vérification, les plans de fermeture et de post-fermeture ainsi que des garanties financières. En 2006, le Ministère de l'Énergie et des Mines du Pérou a publié un guide pour la préparation des plans de fermeture des mines (Garcia, 2008). Ces plans doivent donc être rédigés par des entreprises certifiées par le ministère. Le gouvernement oblige également que ces plans soient rendus disponibles pour la consultation publique à des fins de commentaires via la parution d'un résumé dans le journal régional (Thomas et Pacey, 2004). Tout comme le Québec, le Pérou possède également la *Loi sur l'environnement* soit la *Ley general del ambiente* qui réglemente les obligations en matière de protection de l'environnement. Les processus de consultation sont inclus dans *La Ley del derecho a la consulta previa a los pueblos indígenas u originarios*.

4.4.1 Lois et règlements applicables

La *Ley que regula la cierre de minas* a pour objectif de décrire les obligations que les personnes possédant des titres miniers doivent respecter concernant la remise d'un plan de fermeture de mines ainsi que les garanties appropriées. Ce plan a pour but de protéger et préserver l'environnement afin d'atténuer les impacts négatifs pouvant affecter la santé de la population ainsi que les écosystèmes. Selon la loi, la restauration doit se conformer aux normes techniques établies, soit celles qui permettent d'éliminer, de mitiger et de contrôler les effets adverses environnementaux ou ceux pouvant être générés des résidus solides, liquides ou gazeux. Tout comme le Québec, c'est au rôle au gouvernement, soit le Ministère de l'Énergie et des Mines (Ministerio de Energia et de Minas) d'assurer la conformité du plan de fermeture avant le début des travaux. Le plan doit contenir une description des méthodes de restauration, leurs coûts, les méthodes de contrôle et de suivi en plus d'une description des garanties exigées. Ensuite, le *Reglamento para el cierre de mina* est beaucoup plus exhaustif que la loi qui est rattachée. C'est dans ce règlement que l'on retrouve la définition de restauration, qui se définit comme étant le processus permettant de rétablir la stabilité chimique et physique des lieux ayant été perturbés par des activités humaines, de retrouver les communautés floristiques et fauniques atteintes, tout en présentant peu de risques pour

la santé humaine, dans la mesure du possible, et finalement de rencontrer des caractéristiques favorisant un usage des terres affectées, que ce soit passif ou actif. Il rappelle également que ce plan permet d'assurer le suivi des résidus pour que ceux-ci ne soient pas une source de contamination pour le milieu environnant. Le règlement explique que la garantie financière demandée doit être constituée d'un montant suffisant nécessaire à la réalisation complète du plan de fermeture basé sur l'estimation des montants calculés et actualisés. À la différence du Québec, c'est donc le montant total des coûts des travaux qui est demandé.

La *Ley general del ambiente* rappelle les concepts importants retrouvés dans la loi encadrant l'activité minière et dans le règlement correspondant dans la section traitant des plans de fermeture des activités. En effet, cette section mentionne que les titulaires réalisant des activités économiques doivent garantir qu'à l'arrêt de ces activités, aucun impact négatif significatif ne doit persister en se servant des instruments de gestion environnementale appropriée. La loi dicte que les autorités appropriées établissent des dispositions spécifiques concernant la fermeture, l'abandon, la post-fermeture des activités ainsi que sur les contenus des plans et les conditions qui garantissent son application. Tout comme le Québec, c'est dans cette loi que se retrouve l'obligation de procéder à l'évaluation des impacts de projets miniers. L'article dans la loi est beaucoup plus général puisqu'il dicte que, toute activité humaine qui implique des travaux de construction des ouvrages, des services ou toute autre activité qui est susceptible de causer des impacts environnementaux de caractère significatif, est assujettie au système national d'évaluation des impacts environnementaux (SEIA).

Afin d'assurer la consultation des communautés indigènes, *La Ley del derecho a la consulta previa a los pueblos indígenas u originarios* est destiné à assurer un processus de consultation pour les mesures législatives et administratives affectant les droits collectifs des communautés indigènes ainsi que tous les projets de développement national et régional qui affectent directement ces droits. Ce processus a pour but d'obtenir un accord ou un consentement entre l'État et les communautés rurales. Par sa définition, les communautés

sont donc dans l'obligation d'être consultées en ce qui concerne le développement minier sur leur territoire (Congreso de la Republica de Perú, 2010).

4.4.2 Guía para la elaboración de planes de cierre de minas

Tout comme le Québec, le gouvernement a rédigé un guide pour aider les titulaires d'activités minières dans leur rédaction du plan de fermeture appelé « Guía para la elaboración de planes de cierre de minas » (Ministerio de energía y minas de la República del Perú, 2006). Ce guide a pour objectif de diriger les titulaires de droits miniers, lors de la rédaction du plan de fermeture d'une mine, pour s'assurer que leur plan correspond aux attentes et remplit toutes les obligations du ministère. C'est également dans ce guide que l'on retrouve les obligations en matière de végétalisation.

Concernant les plans de restauration des sites miniers, le gouvernement a décidé d'exiger deux types de plan de fermeture. Le premier doit être plus détaillé et est exigé pour la majorité des opérations minières. Le second est plus simplifié et est demandé pour les activités de moins grandes envergures comme pour les activités d'exploration.

Comparativement aux exigences du plan de restauration du Québec, celles du Pérou sont beaucoup plus détaillées et exhaustives. Les objectifs du plan de restauration sont divisés en cinq points soit la stabilité physique à long terme, la stabilité chimique à long terme, la restauration des aires affectées, l'utilisation alternative des installations construites pour les communautés locales et la détermination des conditions favorisant l'usage possible futur des aires ou installations.

4.4.2.1 Exigences en matière de végétalisation

Le programme de revégétation est très exhaustif et est beaucoup plus complet que celui du Québec. En effet, il traite entre autres de la superficie totale à être couverte, des additifs pour le sol (matière organique, fertilisants), la sélection des espèces priorisant les espèces natives, les méthodes de récolte et de conservation des graines avant le début des travaux,

les écosystèmes qui seront rétablis en fonction des reliefs ainsi que le suivi de l'implantation et de la croissance des nouveaux végétaux. Ce programme devra contenir le recouvrement pour toutes les installations liées à la mine comme au Québec.

Le programme est très poussé et il inclut même l'utilisation de serres spécialement construites pour les projets de restauration. Ainsi, le plan de fermeture doit documenter la quantité des graines ou des plantations qui seront nécessaires à la végétalisation complète du site. Il doit également être spécifique quant à la manière dont les écosystèmes restaurés seront similaires à ceux présents avant le début des travaux et doit contenir une estimation de leur productivité. Ces écosystèmes devront également être autosuffisants à long terme et le titulaire doit être en mesure de le prouver. Le programme de monitoring comprend une description des études périodiques qui doivent être menées pour chaque type de relief pour assurer la croissance des végétaux.

3.5 Conclusion du contexte législatif et des obligations de la restauration

Pour conclure, les pays développés ont généralement une législation plus contraignante pour les entreprises exerçant l'extraction minière comparativement aux pays en développement. Cependant, cette affirmation n'est pas toujours vraie, tel qu'il a été prouvé avec une province canadienne, le Québec, et la République du Pérou. Surtout concernant les obligations liées à la végétalisation des sites perturbés, le Pérou détient des exigences beaucoup plus détaillées, poussées et précises comparativement au Québec. Dans le guide réalisé par le gouvernement du Québec, une attention particulière est donnée à la conservation du sol pour qu'il soit étendu à nouveau à la fin des travaux. Dans la législation du Pérou, le plan de restauration doit être extrêmement spécifique concernant tous les aspects de la mise en végétation (obtention des graines, l'utilisation d'additifs, les espèces choisies, une estimation de la productivité, etc.). De plus, la législation du Pérou est plus stricte que celle du Québec, car il est exigé que la totalité des frais nécessaires à la restauration complète du site soit amassée comparativement à 70 % des coûts selon la législation du Québec.

Chapitre 5

Discussion sur les éléments essentiels à intégrer lors de la végétalisation

Tel que mentionné à la section 2.3.2, peu de sites miniers se régénéreront de façon satisfaisante, donc qui retrouveront une allure naturelle accompagnée d'un état fonctionnel, c'est-à-dire, regagner les dynamiques de départ permettant les interactions entre organismes vivants et les éléments abiotiques, selon les délais alloués pour compléter les travaux de restauration sans nécessiter d'assistance par la suite.

C'est pourquoi un programme de végétalisation approprié et bien géré peut assurer que le site puisse retrouver rapidement une allure naturelle (Tordoff *et al.*, 2000). Tous les projets de restauration incluent des objectifs spécifiques pour diriger les activités tout au long des travaux. Lorsque les objectifs sont de recréer l'écosystème de départ, il peut nécessiter une longue période de temps pour que le nouvel écosystème ressemble à celui voulu. Ainsi, les efforts peuvent être orientés afin de créer un écosystème autosuffisant pour que les processus de succession mènent finalement à la végétation désirée (Ghose, 2004). De plus, il est important de se rappeler que le retour d'un site perturbé à un site stable, productif et autosuffisant est un processus à long terme (Government of Queensland, 1995). Pour que ce programme soit jugé efficace, plusieurs éléments doivent être inclus pour assurer le succès des travaux de restauration et atteindre les objectifs préétablis au départ. Ce chapitre a été divisé de façon à couvrir tous ces éléments. D'abord, les caractéristiques spécifiques des sites miniers sont décrites suivies par les différentes méthodes de stabilisation des résidus. Ensuite, les éléments sont abordés dans l'ordre suivant : la topographie, le substrat et les amendements, la sélection des espèces, les méthodes d'ensemencement, le retour de la faune pour terminer avec les critères de performance et les méthodes de suivi.

5.1 Caractéristiques des sites miniers

Afin de comprendre le contexte spécifique dans lequel sont réalisés les travaux liés à la végétalisation, il est important d'exposer les caractéristiques de types physiques, chimiques ainsi qu'environnementales et biologiques, des sites miniers attribuables à la très grande présence de rejets. Ces caractéristiques sont d'ailleurs toutes des obstacles qui nuisent au rétablissement du couvert végétal. Tel que déjà mentionné auparavant, l'exploitation minière produit deux types de résidus. Le premier type de roche est la roche stérile qui provient du décapage du sol, de la machinerie de concassage et de la roche contenant des concentrations trop infimes de minerai pour être broyées. Cette roche de taille plus grossière possède des diamètres variant entre 2 et 20 cm. Le second type de rejet est le résidu minier qui est composé des roches très finement broyées qui proviennent des processus de broyage et de concentration. Ces roches possèdent en moyenne des diamètres de moins de 2 mm (Tordoff *et al.*, 2000). Ainsi, l'établissement d'une végétation sur ces deux types de rejets est sujet à des restrictions physiques sévères. En effet, les sols composés de ces types de rejets peuvent soit difficilement retenir l'eau ou empêcher l'infiltration adéquate de l'eau dans le sol et sont donc, sujets à des périodes régulières et prolongées de sécheresse. En plus d'être un frein à la croissance des plantes, ces caractéristiques ne sont également pas propices à la germination des semences (Tordoff *et al.*, 2000).

Ensuite, les caractéristiques chimiques des rejets miniers causent également d'importantes limitations à la croissance des végétaux. Comme la plupart des sols miniers contiennent des concentrations résiduelles en métaux lourds, en plus de certains autres contaminants qui peuvent répercuter directement les végétaux, en causant de la phytotoxicité. Les métaux lourds se réfèrent à tous les éléments métalliques qui possèdent une densité relativement haute et qui sont toxiques même à basses concentrations. Ces métaux lourds incluent par exemple le plomb, le cadmium, le nickel, le cobalt, le fer, le zinc, le chrome, l'arsenic et l'argent. Cette phytotoxicité peut affecter la plante de différentes façons selon le ou les métaux présents en excès et leur concentration. Ces métaux causent plusieurs répercussions sur les processus physiologiques et biochimiques qui se traduisent par une

diminution de la croissance et de la production de biomasse. Si la croissance racinaire est affectée, ceci peut alors augmenter la susceptibilité à la sécheresse (Nagajyoti *et al.*, 2010). Les concentrations résiduelles en métaux lourds varient considérablement d'un site à l'autre et même d'un endroit à l'autre sur le même site. Les concentrations peuvent fluctuer de 0,1 % à plus 5 %, selon si les résidus ont été entreposés récemment puisque les techniques d'extraction des métaux utilisées aujourd'hui sont beaucoup plus efficaces qu'elles ne l'étaient anciennement (Tordoff *et al.*, 2000). Cependant, les métaux résiduels sont souvent accompagnés par d'autres métaux non désirés qui se retrouvent également dans les résidus. Les concentrations totales en métaux lourds supérieures à 0,1 % sont généralement phytotoxiques, mais ces seuils sont souvent influencés par plusieurs facteurs comme le pH qui détermine la biodisponibilité de ces métaux. Ainsi, plus un site possède un pH qui est bas, inférieur à 4, plus les métaux sont biodisponibles et phytotoxiques pour les plantes. De plus, le niveau de susceptibilité à la toxicité aux métaux lourds varie d'une espèce à l'autre (Tordoff *et al.*, 2000).

Également, les sites miniers possèdent des caractéristiques environnementales spécifiques qui nuisent au rétablissement des végétaux. Ces sites sont souvent composés de substrats infertiles et dépourvus de nutriments essentiels tels que l'azote, le phosphore et le potassium, qui sont nécessaires à la croissance de végétaux. Ce problème est accentué par le manque d'argile et de matière organique qui sont nécessaires à la rétention de ces nutriments et à l'échange cationique se déroulant normalement dans les sols (Tordoff *et al.*, 2000). En l'absence d'un substrat adéquat, les apports en fertilisants risquent d'être lessivés et donc ne pas être disponibles pour les végétaux. D'autres facteurs environnementaux peuvent également affecter les sites miniers tels que des températures extrêmes, des bourrasques de vent et l'instabilité des pentes qui causent des répercussions négatives supplémentaires pour l'établissement de la végétation (Tordoff *et al.*, 2000). Ces facteurs contribuent également à l'accumulation de très grandes concentrations en sel due à la très haute évapotranspiration et les basses infiltrations en eau (Mendez et Maier, 2008a).

Finalement, des facteurs biologiques jouent également un rôle dans la croissance des plantes, particulièrement au niveau des micro-organismes des sols et des mycorhizes. Comme les micro-organismes contribuent au cycle des nutriments en décomposant la matière végétale, ils font donc partie d'une composante intégrale des écosystèmes (Tordoff, *et al.*, 2000). Quant aux mycorhizes, elles sont retrouvées chez environ 80 % des plantes vasculaires. Celles-ci forment des relations symbiotiques avec la plante et peuvent fournir plusieurs bénéfices tels que l'amélioration de l'absorption des nutriments et de la défense de la plante. En effet, les mycorhizes forment un réseau plus élargi autour du système racinaire et permettent d'atteindre les éléments situés dans un rayon plus large (Schroeder *et al.*, 2011).

Sur les sites miniers, la présence et la diversité des communautés microbiennes et de mycorhizes sont beaucoup plus basses comparativement à celles étant normalement présentes dans des sols non contaminés (Mendez et Maier, 2008a). Leur faible présence au sein des rejets miniers résulte en un ralentissement du cycle du carbone et des nutriments entraînant une diminution de l'absorption des nutriments. Les plantes doivent alors surmonter plusieurs types de contraintes lors de leur développement sur un site minier, qui constituent des facteurs qui peuvent sévèrement limiter la croissance des végétaux (Ghose, 2004).

5.2 Méthodes de stabilisation des résidus miniers

Il existe plusieurs façons de stabiliser les résidus miniers dans le sol pour éviter qu'ils ne soient transportés ou déplacés des sites miniers. Les méthodes conventionnelles de restauration des résidus miniers regroupent les méthodes physiques et chimiques. Les méthodes physiques, par exemple, peuvent désigner le recouvrement des résidus par un matériau possédant une granulométrie fine réduisant les possibilités d'érosion, qui est généralement composée de roche stérile, de gravier, de sol excavé lors des opérations de décapage ou simplement d'argile (Mendez et Maier, 2008a). Il existe également des matériaux synthétiques tels que des géomembranes peu perméables qui possèdent les mêmes propriétés. Ainsi, ces techniques ont pour objectif de pouvoir empêcher la percolation

de l'eau profondément dans les aires d'entreposage des résidus (Bussière *et al.*, 2005). Cependant, lorsque cette technique est utilisée à grande échelle, celle-ci peut être limitée par la disponibilité de matériel adéquat et par le coût élevé du transport. Cette technique possède également l'inconvénient qu'elle ne prévient pas toujours le lessivage des métaux vers les cours d'eau adjacents. La stabilisation chimique a également pour but de prévenir l'érosion, mais mise plutôt sur l'utilisation d'agents chimiques tels que des sulfonates de lignines ou des adhésifs de résine, qui en combinaison avec les résidus miniers, forment une croûte pour limiter leur contact avec l'atmosphère et les cours d'eau (Mendez et Maier, 2008a). Néanmoins, en plus d'être très dispendieuses et inesthétiques, ces deux techniques sont temporaires et elles ne sont pas conçues pour être utilisées à long terme. En effet, ces solutions ne procurent pas une croûte permanente dans les milieux arides et semi-arides, puisqu'elles se brisent sous l'influence des processus de séchage et d'humidification, en plus de la mauvaise consolidation due aux très hautes concentrations en sel. De plus, les méthodes conventionnelles coûtent environ 1,50 à 450 \$ US par m³ de résidus miniers alors que la phytostabilisation peut réduire les coûts à 0,40 à 26 \$ US par m³ (Mendez et Maier, 2008a).

L'utilisation de végétaux pour stabiliser les rejets sur les sites miniers, nommée phytorestauration, est une technique innovatrice qui permet de contrebalancer les inconvénients engendrés par les méthodes conventionnelles. Conséquemment, la stabilisation par les végétaux est beaucoup plus économique et peut être utilisée à long terme. Cette technique sert à immobiliser les métaux par adsorption dans le sol ou par accumulation dans la biomasse afin d'éviter qu'ils ne quittent le site minier (Mendez et Maier, 2008a). Plus spécifiquement, il existe deux approches pour procéder à la phytorestauration soit la phytostabilisation et la phytoextraction. La phytostabilisation insiste sur les processus permettant l'immobilisation des métaux par adsorption dans la rhizosphère de la plante ou par accumulation dans la biomasse racinaire. Cette technique favorise donc la précipitation des métaux pour les rendre moins solubles par l'augmentation de la réduction métallique et par la formation de complexes métalliques avec des composés biologiques (Mendez et Maier, 2008b). Ainsi, leur biodisponibilité est réduite et favorise la stabilisation des résidus à

long terme dans le sol (Mendez et Maier, 2008b). Les espèces utilisées pour cette technique sont surtout celles étant génétiquement tolérantes aux métaux, soit les pseudométallophytes et les métalloytes. Ces espèces sont abordées plus en détail à la section 5.5.1 de ce chapitre.

Quant à la phytoextraction, cette technique implique la translocation de métaux lourds aux parties aériennes de la plante. Une fois que les concentrations atteignent les niveaux visés, les plantes sont ensuite récoltées et disposées dans les matières dangereuses ou incinérées pour en récupérer les métaux. Les espèces utilisées pour retirer les contaminants métalliques du sol sont des espèces accumulatrices ou hyperaccumulatrices qui minimisent également l'entrée des métaux dans la chaîne alimentaire (Mendez et Maier, 2008b). Cependant, ces techniques possèdent également des désavantages. En réalité, la phytostabilisation est limitée par le manque de connaissances sur les quantités d'amendements nécessaires afin de maximiser la séquestration à long terme des métaux alors que pour la phytoextraction, son efficacité est entravée selon les caractéristiques des plantes. Par exemple, les plantes hyperaccumulatrices, qui concentrent les métaux dans les parties aériennes à des concentrations 100 fois plus élevées par rapport aux autres plantes, possèdent généralement un réseau racinaire superficiel qui limite donc l'accessibilité aux métaux situés profondément dans le sol. L'efficacité à extraire les métaux peut être réduite lorsque les concentrations sont extrêmement hautes étant donné les faibles taux de production de biomasse dans les environnements hostiles. Ces facteurs font en sorte que les taux d'élimination des métaux dans le sol sont très faibles et peuvent prendre une durée considérable puisque plusieurs récoltes peuvent être nécessaires avant d'obtenir les niveaux jugés acceptables. Cette technique est donc plus appropriée lorsque les niveaux des contaminants sont faibles ou modérés (Whiting *et al.*, 2004). De plus, leur utilisation ne peut également pas être utilisée à grande échelle étant donné que le ruissellement provenant de ces sites peut encore contenir des concentrations en métaux lourds au dessus des valeurs acceptables (Ghose, 2004).

Les taux d'élimination varient selon les concentrations en métaux présentes au départ et la quantité de métaux que chaque plante peu absorber. Le tableau 5.1 compare les principales

différences entre les plantes utilisées pour la phytoextraction et celles pour la phytostabilisation.

Tableau 5.1 Caractéristiques des plantes pour la phytoextraction et la phytostabilisation

	Phytoextraction	Phytostabilisation
Caractéristiques générales	Haute biomasse, croissance rapide	Canopée ou couvert végétal large, pérenne, réseau racinaire profond
Facteur de bioconcentration	$\square 1$	$\square 1$
Facteur de translocation	$\square 1$	$\square 1$
Concentrations aux parties aériennes (mg kg ⁻¹) ^c		
As	$\geq 1\ 000$	≤ 30
Cd	≥ 100	≤ 10
Cu	$\geq 1\ 000 - 5\ 000$	≤ 40
Mn	$\geq 1\ 000 - 10\ 000$	$\leq 2\ 000$
Pb	$\geq 1\ 000 - 10\ 000$	≤ 100
Zn	$\geq 10\ 000$	≤ 500

Traduction libre

Source : Mendez, M. O. et R. M. Maier (2008b)

Le facteur de bioconcentration, aussi appelé coefficient d'absorption biologique, se définit comme étant la concentration en éléments qui peut être stockée dans les parties aériennes divisé par la concentration totale en éléments dans les résidus miniers. Le facteur de translocation également connu sous le ratio *root : shoot* se calcul en divisant la concentration totale en éléments qui peut être accumulée dans les parties aériennes divisée par la concentration totale en éléments qui peut être stockée dans les parties racinaires.

5.3 Topographie

La topographie est un élément essentiel de la végétalisation étant donné que presque tous les cas d'extraction minière produisent des changements dramatiques au paysage. Inévitablement, l'extraction minière cause la formation d'immenses piles de roches qui sont extrêmement inesthétiques (Ghose, 2004). Ainsi, avant de procéder à l'épandage du sol, la topographie et le paysage doivent être modifiés considérablement pour assurer la reprise adéquate du couvert végétatif. Le type d'exploitation minière influence sur le degré de perturbation à la topographie. L'exploitation souterraine cause normalement peu de perturbations puisqu'une plus petite superficie de sol est excavée tandis que l'exploitation à ciel ouvert provoque la destruction de la végétation existante et des horizons du sol sur une surface extrêmement grande. Pour diminuer la quantité de roches empilée, une partie de ces roches peut être utilisée pour remplir les cavités créées et ainsi égaliser le paysage (Ghose, 2004). Cette reconstruction de la topographie permet ainsi de rétablir un profil stable qui fournit des patrons de drainage adéquats.

Ainsi, si le but est de rétablir la végétation indigène de départ, la nouvelle topographie peut être très similaire à celle présente dans le paysage non perturbé (Gouvernement of Queensland, 1995).

5.4 Substrat

Le type et la structure du substrat sont importants afin de déterminer le type de végétation qui sera en mesure de croître adéquatement. Pour y arriver, il existe deux substrats possibles. Premièrement, il est suggéré de déplacer et d'entreposer le sol présent à l'endroit où la roche est prévue être excavée en pile sur le site minier. Cependant, il arrive que la qualité de ces sols se détériore et ne peut donc pas être utilisé lors de la végétalisation. Lorsque cette situation se produit, un substrat alternatif doit alors être utilisé. Cette section se termine avec un survol des différents amendements possibles afin de rectifier la fertilité et le pH des sols.

5.4.1 Sol

Dès que le couvert végétatif est retiré, les couches supérieures du sol devraient être enlevées avant toutes activités de forage, d'explosion ou toutes autres perturbations pouvant avoir une incidence sur leur qualité. Il est également important que les couches supérieures du sol soient retirées et entreposées séparément étant donné que les horizons ne possèdent pas les mêmes caractéristiques et fonctions. La première couche est l'horizon A, facilement distinguable, du fait qu'elle est plus foncée que les autres due à une accumulation de la matière organique. C'est également elle qui est la plus fertile et qui possède la meilleure structure ainsi que la majorité des graines, des propagules, des micro-organismes du sol et des nutriments. Cette couche peut varier en profondeur, mais est généralement située vers 50 mm et n'est jamais plus épaisse que 300 mm (Government of Queensland, 1995). Ensuite, l'horizon B est l'endroit où s'accumulent les minéraux, les silicates et les argiles lessivés. L'horizon C est constitué surtout de roche-mère et insensible aux mouvements de l'eau et des minéraux (Société canadienne d'hypothèque et de logement, 2011). Pour les besoins de développement racinaire, les horizons B et C peuvent être mélangés puisqu'ils ont des caractéristiques semblables. Ceux-ci devraient être entreposés ensemble et utilisés comme couches inférieures lors de la restauration du sol (Ghose, 2004).

La préservation de la qualité des horizons supérieurs du sol est le facteur le plus important pour assurer le succès de la restauration puisque pendant le processus minier, plusieurs changements se produisent aux propriétés chimiques, physiques et microbiologiques du sol. D'ailleurs, il peut s'écouler une longue période de temps entre le temps où le sol est retiré et le moment lorsqu'il est étendu à nouveau. C'est pourquoi la qualité du sol peut se détériorer pendant l'entreposage et ultimement devenir stérile. Il est donc nécessaire d'assurer la préservation de la qualité du sol lors de la restauration de sites miniers pour éviter qu'ils ne diminuent trop en qualité. De plus, si le sol n'est pas restauré à temps, le lessivage retire les nutriments rendent le sol biologiquement peu productif (Ghose, 2004). Les couches supérieures du sol sont essentielles pour la croissance des végétaux et doivent absolument être conservées pour la restauration.

Conséquemment, il existe deux façons de gérer adéquatement le sol. D'abord, il est possible de créer des piles distinctes et qui seront étendues au moment venu de la restauration complète du site. La seconde façon consiste en la méthode du retour direct et de procéder à la restauration progressive du site dès qu'une section a été excavée et remblayée. Cependant, puisqu'il existe beaucoup plus de désavantages à utiliser la première méthode, la méthode du retour direct est davantage recommandée. La méthode d'entreposage du sol à long terme demande qu'une superficie beaucoup plus grande de terrain soit retirée de sa végétation pour garantir un espace suffisant pour accueillir les piles de sol. L'entreposage en piles affecte la structure et la qualité des sols du fait qu'ils sont stockés pendant une période de temps beaucoup plus longue. De plus, le fait de créer des piles réduit l'aération du sol et peut le rendre anaérobique, affecte la structure et la fertilité du sol et détériore la qualité des graines et des propagules (Ghose, 2004). Les micro-organismes bénéfiques sont également considérablement réduits par la pauvre aération causée par l'entreposage. Il a également été prouvé que la densité et le nombre d'espèces indigènes sont considérablement réduits lorsque le site est restauré de cette façon, car ces graines sont généralement plus sensibles comparativement aux espèces exotiques qui peuvent survivent beaucoup plus longtemps (Ghose, 2004). C'est pourquoi il est davantage recommandé d'utiliser la technique du retour direct, d'ailleurs beaucoup plus utilisée. Ce processus implique de retirer le sol à un endroit qui s'apprête à être préparé pour l'extraction minière et la replacer à un autre endroit qui est prêt à être rétabli. Cette technique demande cependant que la restauration soit complétée de façon progressive. Ainsi, cette méthode évite que les sols soient entreposés pendant une longue période de temps, qu'ils soient doublement manipulés et permet également de réduire la superficie des terrains qui doit être excavée. Il permet ainsi de réduire la perte de viabilité des graines et d'augmenter la diversité des plantes pendant la restauration. Ainsi, le retour direct permet également d'éviter les pertes de nutriments et la diminution de matière organique et de micro-organismes (Alcoa, 2011). Pour éviter de causer des dommages au sol inutilement, celui-ci devrait être stocké seulement lorsqu'il n'est pas possible de le transférer directement sur une aire qui est prête à recevoir une nouvelle couche de sol. De plus, les amas de terres devraient seulement être entreposés sur des aires stables et protégées du vent et de l'érosion pour éviter qu'ils ne soient contaminés (Ghose, 2004).

Une fois les activités terminées et que les cavités sont remblayées, le sol doit être distribué uniformément de manière à assurer une compaction compatible avec le besoin des plantes qui seront utilisées pour la restauration du site (Ghose, 2004).

5.4.2 Amendements

La plupart des programmes de restauration incluent l'application d'amendements durant la phase d'établissement. Le type d'amendement et le nombre d'applications varient selon le site, le type de sol ainsi que les usages futurs du site. Les amendements sont une façon de diminuer les concentrations des métaux toxiques dans le sol étant donné que l'ajout de nouvelles matières permet de diluer la toxicité du site. Il existe deux manières de procéder à l'ajout d'amendements, soit en utilisant des amendements organiques ou inertes. Tous les amendements ont pour but d'améliorer les conditions du substrat pour permettre l'établissement plus rapide du couvert végétal (Tordoff *et al.*, 2000).

Les amendements organiques sont des fertilisants surtout composés de tourbe, de matière humique, de boues d'égout ou même de déchets ménagers riches en nutriments essentiels (Tordoff *et al.*, 2000). Ils apportent plusieurs avantages tels que l'amélioration des propriétés physiques du substrat en procurant une augmentation de la rétention en eau et en nutriments essentiels. Même appliqués en minces couches, ils améliorent la structure physique des sols et procurent également des nutriments essentiels en libération lente pour encourager le rétablissement du couvert végétal (Tordoff *et al.*, 2000). Les nutriments du sol sont divisés en deux catégories, les macronutriments et les micronutriments selon les concentrations dont les plantes ont besoin pour se développer normalement. Les macronutriments sont l'azote, le phosphore, le calcium, le magnésium, le potassium et le soufre alors que les micronutriments sont le zinc, le cuivre, le manganèse, le fer, le molybdène, le bore, etc. L'azote et le phosphore sont les principaux éléments limitant la croissance des végétaux (Government of Queensland, 1995). Également, les amendements favorisent le rétablissement du couvert végétal puisqu'ils facilitent l'absorption des nutriments essentiels à la croissance des plantes en favorisant les échanges cationiques (Tordoff *et al.*, 2000). Les

amendements organiques peuvent également être l'ajout de champignons mycorhiziens pour maximiser les succès de la végétalisation. Les mycorhizes forment alors des symbioses avec certaines espèces et fournissent ainsi des éléments nutritifs aux plantes (Tordoff *et al.*, 2000). De plus, le type de fertilisant et le nombre d'application varient selon les concentrations déjà présentes dans le substrat et les caractéristiques du milieu qui influenceront la disponibilité des nutriments et ultimement les types de communautés végétales qui s'établiront. Généralement, les espèces indigènes nécessitent des quantités moins importantes de nutriments que les plantes exotiques. Si les applications sont trop fréquentes, il peut mener à des concentrations toxiques pour les plantes (Government of Queensland, 1995) ou stimuler la croissance d'espèces indésirables (Ghose, 2004).

Les amendements inertes sont surtout composés de résidus provenant de différents types d'extraction tels que des résidus de chaux, d'ardoise ou de gypse. Comme amendements inorganiques, les apports de chaux sont communs pour diminuer l'acidité des résidus miniers. En augmentant le pH, les métaux sont alors moins solubles et moins toxiques pour les végétaux (Tordoff *et al.*, 2000). Comme les amendements organiques fournissent une solution temporaire, il peut nécessiter plusieurs applications selon les baisses des nutriments et de la matière organique dans le sol. Les amendements inertes procurent une solution à plus long terme pour le traitement des résidus miniers et diminuent les possibilités de toxicité causées par les métaux lourds. Alors que les racines des végétaux pénètrent assez profondément dans le sol, ils entrent en contact avec les rejets toxiques qui peuvent alors causer une régression du couvert végétal (Tordoff *et al.*, 2000).

Pour qu'un écosystème soit autosuffisant, la demande en nutriments doit être rencontrée via le cycle des nutriments et des suppléments provenant de l'eau de pluie, des dépôts secs, de l'érosion des roches et par la fixation de l'azote. Ainsi, le maintien de la capacité du sol à fournir des nutriments, à entreposer l'eau et à supporter la croissance des racines sont des enjeux importants afin de développer un écosystème durable. Les activités minières causent le retrait de la végétation et conséquemment la perte de certains nutriments dans le sol surtout lorsque la majorité est présente dans la matière végétale comme dans le cas des sols

tropicaux. C'est pour cette raison que l'ajout d'amendements est souvent nécessaire pour retrouver la fertilité des sols une fois l'extraction minière terminée (Ghose, 2004). Ce n'est qu'avec le temps que le recyclage des nutriments peut se faire grâce à la décomposition et la litière et des micro-organismes (Government of Queensland, 1995).

En fonction des caractéristiques de chaque site et des résidus, les techniques de restauration des sols varient considérablement. Cependant, chaque technique possède ses problèmes respectifs qui sont décrits au tableau 5.2.

Tableau 5.2 Variabilité des techniques de restauration utilisées sur les sites miniers basée sur la toxicité, l'acidité et la salinité des résidus miniers

Caractéristique des résidus	La technique de restauration appropriée	Les problèmes associés
Des concentrations basses en métaux et faible toxicité. Pas de problèmes majeurs d'acidité ou d'alcalinité.	Améliorer le sol en appliquant de la chaux, des fertilisants ou de la matière organique. Utiliser des graines commerciales ou récoltées. Utiliser une mince couche de sol si disponible.	Dans les climats arides, un suivi à long terme peut être nécessaire pour assurer la maintenance et l'irrigation. Le broutage devrait être surveillé, car la végétation pourrait emmagasiner des concentrations toxiques pour le bétail.
Des concentrations moyennes en métaux et toxicité moyenne. Des problèmes de salinité ou d'acidité moyens.	Améliorer le sol en appliquant de la chaux, des fertilisants et de la matière organique. Ensemencer avec des variétés de plantes tolérantes aux métaux (sel et acidité) ou avec des graines récoltées de métalophytes ou de plantes tolérantes au sel.	Seulement quelques espèces sont disponibles. Les coûts associés à la récolte peuvent être élevés. La fertilisation peut demander une longue période de temps. Le broutage par les animaux sauvages n'est pas recommandé étant donné l'entrée de métaux lourds dans la chaîne alimentaire.
De concentrations hautes en métaux et toxicité élevée.	Traiter la surface avec 10-50 cm de matériel inoffensif tel que des roches stériles, de la chaux, des fertilisant et semer avec des espèces indigènes.	La régression du couvert végétal peut survenir si les toxines solubles migrent vers les couches supérieures du sol.
Des concentrations très hautes en métaux et toxicité très élevée. Très grands problèmes en acidité ou en salinité.	Couvrir la surface avec une couche de 30 à 100 cm de la roche non minéralisée et couvrir ensuite avec un substrat approprié pour l'enracinement.	Cette technique peut demander des coûts très élevés et il est possible de voir apparaître la régression au travers de la sécheresse ou si l'enracinement pénètre au travers de la couche séparatrice.

Traduction libre

Source : Cooke, J.A. et Johnson, M.S. (2002)

5.4.2 Substrat alternatif

Il existe certaines situations où le sol ne peut pas être utilisé pour servir de support aux plantes. Parfois, les coûts de transport du sol sont trop élevés ou le sol contient une quantité trop élevée de mauvaises herbes ou des pathogènes qui ne sont pas compatibles avec les objectifs de la restauration. Alors, d'autres substrats doivent être utilisés pour remplacer le sol normalement utilisé, par exemple, les couches inférieures du sol, les roches stériles et les roches excavées durant l'extraction. Comparativement aux sols normaux, les caractéristiques physiques et chimiques des substrats alternatifs peuvent présenter des défis extrêmes pour la colonisation des plantes ou pour le développement de n'importe lequel écosystème autosuffisant. Ainsi, ces substrats nécessitent des techniques pour contrer la toxicité des sites miniers et modifier la structure des sols pour qu'ils soient compatibles avec la croissance des végétaux (Cooke et Johnson, 2002). En conséquence, certains amendements, abordés à la section 4.4.3, peuvent être nécessaires pour favoriser la pousse d'un couvert végétal.

Il est donc important de modifier la nature chimique des substrats alternatifs. Presque la majorité des substrats alternatifs contiennent de basses concentrations en macronutriments, surtout en azote, phosphore et en potassium. De même, un pH acide est un problème récurrent dans tous types de résidus qui contiennent des pyrites de fer, qui selon les conditions climatiques, peuvent être générateurs d'acide sulfurique. La toxicité, surtout causée par la présence d'aluminium et de zinc, et plusieurs autres métaux contenus dans les résidus, peut être un obstacle important à la croissance des végétaux. De hautes teneurs en sels est également une problématique à contrer qui peuvent être provoquées par différents processus, par exemple, l'évapotranspiration de la surface des sols dans les climats chauds, la neutralisation par des carbonates, l'addition de certains produits chimiques pendant le broyage et les processus de concentrations (Cooke et Johnson, 2002).

La texture physique joue un rôle important dans l'établissement des végétaux, car selon la source du substrat, celui-ci peut être très fine à plus grossière posant toutes deux des

problématiques très différentes. En effet, des textures très fines peuvent mener, par exemple, à des compactations du sol causant des répercussions sur les infiltrations basses en eau ainsi que des problèmes de stagnation. Il peut alors être intéressant de créer des ravines ou des bassines pour être en mesure de limiter le ruissellement et favoriser l'infiltration de l'eau dans le substrat. Au contraire, si la texture est trop grossière, il n'y a pas assez de rétention suffisante d'eau pour réellement fournir les quantités d'eau dont les plantes ont besoin (Government of Queensland, 1995).

5.5 Sélection des espèces

La sélection des espèces est une étape importante dans tous les programmes de restauration. Ce tri dépend directement des usages futurs du territoire, des conditions du sol ainsi que du climat de la région. Lorsque l'objectif est de rétablir l'écosystème de départ, les espèces choisies sont souvent celles qui étaient présentes avant le rasage du sol (Ghose, 2004). Il est d'ailleurs souvent recommandé d'utiliser des espèces indigènes qui sont déjà adaptées aux conditions climatiques et qui présentent une résistance contre les pathogènes et les ravageurs (Government of Queensland, 1995). De plus, les espèces de provenance locale ont l'avantage de préserver le bagage génétique de la région et elles sont normalement les mieux adaptées aux conditions du sol, aux conditions climatiques ainsi qu'aux processus écologiques du site (Ghose, 2004). Par ailleurs, si l'intention est de prévenir rapidement l'érosion, certaines herbes et légumineuses, possédant une croissance rapide, sont celles à envisager. Selon les utilisations et les objectifs, certaines variétés peuvent également nuire aux utilisations désirées (Government of Queensland, 1995). En effet, si des arbres sont semés en même temps que des espèces à croissance rapide, il peut y avoir de la compétition empêchant les espèces arboricoles de bien se développer.

Malgré qu'il soit souvent recommandé d'utiliser des espèces indigènes, il peut survenir que certaines d'entre elles ne se développent pas aussi bien dans les nouveaux environnements offerts sur les sites restaurés (Ghose, 2004). En effet, les conditions du sol d'un site restauré peuvent être relativement différentes de celles présentes avant l'extraction minière (Ghose,

2004). Par conséquent, lorsque le but est le rétablissement de l'écosystème de départ, l'objectif peut alors être modifié pour ré-établir une végétation qui remplit les mêmes fonctions que l'écosystème présent avant le début des travaux en se servant d'espèces exotiques. Cependant, celles-ci devront être choisies de façon stratégique, puisqu'elles doivent posséder des conditions de croissance similaires, prospérer dans des endroits possédant des caractéristiques de sol semblables, posséder les mêmes exigences en drainage et nécessiter les mêmes conditions climatiques que l'endroit restauré (Ghose, 2004). De plus, il faut être vigilant dans le choix des espèces, pour éviter que leur système racinaire ne soit trop profond et engendre l'introduction d'oxygène ou l'infiltration d'eau dans les résidus déclenchant des réactions chimiques indésirables. En d'autres mots, la sélection des espèces est étroitement influencée par les objectifs et les buts de la restauration. Le choix doit donc s'arrêter sur des espèces qui conviendront aux nouvelles caractéristiques du site restauré (Ghose, 2004).

Une attention doit également être portée pour éviter d'introduire des espèces non voulues telles que des espèces invasives qui peuvent compromettre la croissance de celles désirées. Les espèces fixatrices d'azote, telles que les légumineuses, devraient toujours être considérées pour améliorer la fertilité des sols (Ghose, 2004). Dans certaines situations, la faible concentration en métaux permet la plantation directe dans le sol sans aucune apparition de phytotoxicité (Tordoff *et al.*, 2000). Cependant, lorsque les concentrations sont trop élevées, il faut se tourner vers des espèces qui sont tolérantes aux métaux.

5.5.1 Plantes tolérantes aux métaux

Il existe certains types de plantes, surtout composés de cultivars, qui sont naturellement tolérants à des concentrations élevées en métaux lourds. Les plantes tolérantes aux métaux, les pseudométallophytes, sont des cultivars qui se sont développés grâce à l'évolution des mécanismes biologiques pour résister et tolérer des sols possédant de grandes quantités de contaminants métalliques (Whiting, 2004). Les métallophytes absolues sont des plantes nécessitant des sols contenant de fortes concentrations en métaux lourds pour bien se développer. D'ailleurs, les gènes offrant la résistance aux métaux lourds sont souvent

présents à basse fréquence dans des populations de pseudometallophytes (Ghose, 2004). Ainsi, ces populations tolérantes aux métaux lourds sont le résultat de centaines et même de millions d'années d'évolution qui sont apparues grâce à la sélection naturelle (Ghose, 2004). Ces populations sont d'ailleurs souvent endémiques à leurs sols où ils se sont développés et ils sont donc restreints à une région géographique particulière (Whiting, 2004). Par exemple, certaines espèces telles que *Schinus molle* L., *Isocoma veneta* (Kunth) Greene, *Teloxys graveolens* (Willd.) W.A. Weber., *Euphorbia* sp. et *Dalea bicolor* Humb. & Bonpl. ex Willd. sont des espèces qui ont été ciblées comme étant des métalloytes au Mexique et seraient tolérantes au cadmium, au cuivre, au manganèse, au plomb et au zinc (Mendez et Maier, 2008a). La durée d'exposition aux métaux dicte leur degré de résistance ou de tolérance aux métaux en question. D'ailleurs, une résistance limitée peut être observée chez certaines plantes après quelques années d'exposition. La majorité de ces métalloytes sont capables de tolérer certains métaux dans le substrat, en restreignant physiologiquement l'entrée des métaux par leurs racines et leur entreposage dans leur biomasse (Whiting, 2004). Des plantes encore plus spécialisées, les plantes hyperaccumulatrices, sont capables d'accumuler les métaux dans leur biomasse à des concentrations pouvant dépasser 2 % de leur poids sec (Whiting, 2004).

L'utilisation de plantes tolérantes aux métaux pour végétaliser les sols trop contaminés pour être semés avec des plantes non tolérantes possède plusieurs avantages et certains inconvénients. Les espèces tolérantes aux métaux lourds sont également tolérantes à d'autres stress présents dans les environnements hostiles dont ceux des résidus miniers, comme la faible disponibilité des nutriments et des apports en eau (Ghose, 2004). Cependant, ces cultivars sont très limités et sont surtout composés d'herbes. Un substrat possédant une structure adéquate doit également être présent pour assurer le développement de ces plantes, pour éventuellement obtenir un couvert végétatif complet (Ghose, 2004). Cependant, le paysage risque de ne jamais regagner son allure de départ puisque les espèces sont pratiquement toutes exotiques. Vu que leur croissance est généralement très lente, l'érosion peut avoir lieu avant l'apparition d'un couvert végétatif complet. Les fertilisants doivent donc être appliqués fréquemment pour éviter d'observer la

régression du couvert végétatif, même si les espèces sont adaptées aux sols infertiles. De plus, il peut y avoir des contraintes de spécificité puisque certains cultivars sont seulement adaptés aux métaux sur lesquels ils ont évolué. Leur utilisation peut donc être limitée sur les sols miniers contenant des concentrations élevées de plusieurs types de métaux différents. Ces espèces sont également plus sensibles au piétinement qui réduit leur utilisation pour les usages récréatifs (Ghose, 2004).

Pour optimiser et maximiser les résultats, il peut y avoir une combinaison des approches utilisées soit l'utilisation de différents types d'amendements et/ou avec l'utilisation de cultivars qui sont tolérants aux métaux. Il est alors possible de combiner les avantages de différentes techniques. Tout au long du processus, il est important d'intégrer l'application des principes écologiques, afin de favoriser le succès de la végétalisation tel que la fixation de l'azote, le cycle des nutriments, la décomposition et les processus microbiologiques pour obtenir un écosystème complètement fonctionnel et autosuffisant (Tordoff *et al.*, 2000).

5.5.2 Irrigation

Pour les espèces non adaptées aux mêmes conditions de drainage présentes sur le site, des techniques d'irrigation peuvent être utilisées pour permettre à celles-ci de croître dans les nouvelles conditions du site restauré. Ainsi, plusieurs méthodes existent pour y parvenir, comme l'irrigation goutte à goutte qui permet de fournir l'eau à bas débit aux plantes sur une période relativement longue. Grâce à une pompe et un réservoir, les tuyaux de distribution permettent d'acheminer l'eau à des points stratégiques sur le site (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 1992). L'irrigation n'est pas seulement une manière d'approvisionner le sol en eau, mais permet également de lessiver les sels et les métaux lourds accumulés dans le sol (Ghose, 2004). Cependant, l'irrigation lessive également les nutriments. Pour remédier à cette situation, l'eau doit être appliquée de façon simultanée avec des fertilisants pour favoriser le rétablissement du couvert végétal. Cette technique peut être arrêtée dès qu'une couche d'humus est formée et puisqu'elle possède la capacité de

retenir une certaine quantité d'eau et de nutriments nécessaires à croissance des végétaux (Ghose, 2004).

5.6 Méthodes d'ensemencement

Il existe plusieurs méthodes d'établir un couvert végétal sur des sites restaurés. Il est possible d'y procéder en utilisant différentes parties des plantes comme les propagules, les graines, les tubercules, les rhizomes, les racines ou les bulbes entreposés dans le sol. Il est également permis de procéder par la transplantation de semis cultivés en serre. Une autre façon est de transplanter des individus recueillis dans des zones naturelles. Également, la colonisation naturelle se produit grâce au vent, aux oiseaux et autres animaux terrestres (Ghose, 2004).

Les deux techniques les plus utilisées pour végétaliser un site sont l'utilisation de graines, obtenues localement ou achetées, et l'utilisation de semis. L'utilisation de graines est souvent la manière plus économique par rapport à l'utilisation de semis. De plus, la plantation par des graines démontre une distribution plus aléatoire qui permet d'obtenir une végétation d'allure plus naturelle. Les espèces qui conviennent le plus à cette technique sont celles qui possèdent une très haute viabilité de leurs graines, qui ont un haut taux de germination et un haut taux de survie des juvéniles. Cependant, cette méthode demande beaucoup plus de particularités que de se servir de juvéniles déjà prêts à être transplantés.

Le meilleur temps pour établir la végétation est déterminé par la période des pluies. Ainsi, tous les travaux préparatoires doivent être terminés avant la période de plantation pour maximiser les chances de survie et de germination des graines (Ghose, 2004).

Une des problématiques importantes de la végétalisation est le contrôle des mauvaises herbes, qui peut parfois s'avérer être difficile à gérer. L'infestation de mauvaises herbes peut être difficile à contrôler. Alors, l'accent doit être mis sur la prévention. Une des façons d'y arriver est de défricher les mauvaises herbes dans les zones adjacentes au site restauré

pour éviter de voir apparaître par colonisation naturelle des espèces non désirées. Également, il faut s'assurer que les banques de graines utilisées ne soient pas contaminées par des mauvaises herbes. Pareillement, un couvert dense de plantes désirées est souvent un obstacle efficace contre l'invasion de mauvaises herbes. L'utilisation d'herbicide est une option, mais leur application peut être difficile pour éviter d'affecter les plantes recherchées (Ghose, 2004).

5.6.1 Utilisation de graines

Si le choix s'arrête sur l'utilisation de graines, deux choix sont possibles, soit l'achat ou la récolte de semences. Lorsque celles-ci sont récoltées en milieu naturel, une source adéquate et de qualité doit être obtenue. Cependant, il existe plusieurs difficultés liées à leur collecte. Il faut donc vérifier que les semences sont récoltées lorsqu'elles sont mures et éviter de cueillir des fruits ou des graines ayant été attaquées par les insectes ou par des infections fongiques. Lorsque les graines sont achetées, il faut valider qu'elles ne soient pas contaminées avec des mauvaises herbes et qu'elles soient viables. Idéalement, la provenance des graines devrait être connue permettant de comparer les conditions climatiques entre les deux régions pour s'assurer que les graines conviennent au site (Ghose, 2004). Le meilleur choix reste sans doute des graines récoltées à proximité du site puisque celles-ci sont déjà génétiquement adaptées aux conditions du milieu.

Cependant, la récolte de graines est une méthode qui nécessite beaucoup plus d'efforts. Les graines doivent tout d'abord être retirées de leur capsule et nettoyées avant l'entreposage pour en retirer les débris. Ensuite, les méthodes de traitements varient d'une espèce à l'autre. Ces traitements incluent le séchage au soleil ou au four, de brûler les cônes des conifères, etc. En effet, plusieurs espèces telles que les légumineuses, nécessitent de la chaleur pour germer. Il est également possible de les submerger dans l'eau bouillante pour activer la germination. Ensuite, les semences devraient être entreposées dans des endroits secs à l'abri des insectes et des vermines. Les graines ont parfois besoin d'être traitées avec de l'insecticide et du fongicide avant l'entreposage pour éviter l'attaque des insectes et des

fongus. D'ailleurs, l'exposition au dioxyde de carbone durant une ou deux journées avant l'entreposage a été démontré être un traitement efficace contre les attaques d'insecte pour plusieurs espèces indigènes tropicales (Ghose, 2004). Cependant, la diminution de viabilité pendant l'entreposage est commune. Les semences doivent normalement être entreposées à basse humidité (moins de 10 %) et à basse température. Les exigences en termes de températures peuvent varier selon si l'espèce provient d'un milieu tropical ou tempéré. De plus, certains essais ont démontré qu'il est possible d'améliorer le taux de germination de certaines espèces en procédant à des traitements de fumigation (Ghose, 2004).

Ensuite, la préparation du lit de semence est également une étape importante de la végétalisation. Le but de la préparation d'un lit de semence est de créer un endroit propice à la germination et optimiser l'établissement des plantes. La graine doit être en contact adéquat avec le sol pour faciliter l'absorption de l'eau. Le sol doit également être peu entassé, bien aéré et appliqué de façon uniforme pour permettre aux semences de croître adéquatement. Le lit devrait également être exempt de mauvaises herbes (Ghose, 2004). La profondeur de la couche dépend de la quantité disponible. Suivant les travaux de terrassement et de restructuration, les roches de grandes tailles doivent parfois être retirées ou recouvertes si elles sont incompatibles avec les usages des terres (Government of Queensland, 1995).

L'ensemencement peut être fait tout simplement à la surface du sol ou les graines peuvent être enfoncées dans le sol. Avant de procéder à l'ensemencement, les densités espérées pour chacune des espèces ainsi que la quantité de graines nécessaires pour obtenir ces densités ont besoin d'être estimées puisqu'une certaine proportion risque de ne jamais germer (Ghose, 2004). Également, le taux d'ensemencement varie selon la qualité des graines, les caractéristiques du site et des résidus. Les taux d'ensemencement peuvent être plus élevés s'il n'y a aucun risque de compétition avec d'autres espèces (Government of Queensland, 1995). Les techniques d'ensemencement dépendent de plusieurs facteurs tels que la topographie, la taille du site ainsi que le type de graine. Plusieurs machineries sont utilisées pour procéder à l'ensemencement, mais la distribution manuelle reste la meilleure méthode. En effet, l'utilisation de machinerie peut rendre la tâche difficile lorsqu'une grande

variété de graines est utilisée en même temps, car la machine ne fait généralement pas de discrimination entre les types de graines. L'ensemencement aérien est utilisé pour végétaliser les endroits très larges et surtout lorsque le sol est trop mouillé pour y circuler avec de la machinerie. L'ensemencement hydraulique peut être utilisé pour végétaliser les aires situées dans des endroits trop escarpés (Ghose, 2004).

La période à laquelle les graines devraient être semées varie selon les espèces, car certaines ont besoin de conditions spécifiques d'humidité et de température. Cependant, la majorité devrait être plantée après le début de la période des pluies. De plus, si les graines sont plantées trop précocement, il y a des risques qu'elles soient consommées avant leur germination (Ghose, 2004).

Certains grains possèdent un enrobage qui peut contenir des fertilisants, des hormones de croissance, des pesticides ainsi que des mycorhizes. Cette caractéristique peut aider à la distribution des graines, améliorer la fertilisation des semences, réduire leur perte due aux attaques de champignons ou d'insectes et préinoculer les plantes de type légumineuses et les plantes indigènes avec des micro-organismes bénéfiques (Gouvernement of Queensland, 1995).

5.7 Retour de la faune

Le retour de la faune est la dernière étape pour compléter les travaux de restauration d'un site perturbé. Une multitude de facteurs influencent la fréquentation d'un site par la faune tels que la superficie de la zone restaurée, les populations fauniques entourant la zone ainsi que le succès du programme de restauration. Les espèces qui coloniseront rapidement le site sont celles qui retrouveront les ressources dont elles ont besoin comme la nourriture, des abris et des sites de reproduction (Ghose, 2004). Si l'objectif est de favoriser le retour de la faune le plus rapidement possible, il faut donc recréer un écosystème qui ressemble le plus possible à celui de départ. Cependant, des difficultés peuvent survenir lorsque les populations fauniques sont basses dans les zones adjacentes au site restauré. Cette

problématique peut alors demander des programmes spécifiques de réintroduction pour que des espèces recommencent à fréquenter le site à nouveau. Les espèces qui prennent le plus de temps pour recoloniser le site sont surtout celles dont leurs ressources ne sont pas disponibles dans les habitats qui sont très jeunes. Il est possible de favoriser leur retour en créant des habitats fauniques et des corridors reliant les extrémités du site pendant la restauration à l'aide, par exemple, de bûches ou de souches (Ghose, 2004).

La fréquentation du site par la faune sauvage est un élément important car les animaux contribuent au cycle des successions et des dynamiques écologiques. En effet, plusieurs animaux contribuent à la dissémination des graines. Plus particulièrement, les invertébrés participent à plusieurs niveaux dans les processus écologiques, par exemple, au cycle des nutriments, à la décomposition de la litière, à l'aération du sol et à la pollinisation. Ceux-ci peuvent être réintroduits lors de l'application de nouveau substrat, mais la majorité provient des zones adjacentes au site restauré (Ghose, 2004).

5.8 Critères de performance et méthodes de suivi

Tous les travaux de restauration doivent se terminer par un programme de suivi afin de surveiller les progrès ou la détérioration des zones, le cas échéant, qui ont été restaurées. Les programmes de suivi sont également un moyen de savoir si la restauration est considérée une réussite ou un échec. Il existe plusieurs moyens de pouvoir l'affirmer, par exemple, celle-ci peut être jugée en fonction de l'atteinte des objectifs de départ (Ghose, 2004). Également, la résistance et la résilience sont des concepts importants permettant de vérifier le succès de travaux de restauration. La résistance se définit comme la capacité des écosystèmes à se rétablir à la suite des perturbations (Gauthier *et al.*, 2008). En d'autres mots, un site restauré devrait être capable de résister aux perturbations normales qui occurrent naturellement comme le feu, la sécheresse et les inondations, les attaques de ravageurs, etc. (Cooke et Johnson, 2002). La résilience est la propriété de l'écosystème à retrouver rapidement son équilibre d'origine ou les conditions originales après une perturbation (Gauthier *et al.*, 2008).

Généralement, pour affirmer le succès réel d'un programme de restauration, des critères spécifiques mesurables sont utilisés. Ces critères devraient être définis avant le début des travaux basés sur les objectifs et les buts de la restauration. Les critères peuvent être de type physique (la stabilité, la résistance à l'érosion, le rétablissement du drainage) ou biologique (la richesse en terme d'espèces, la diversité des plantes, la canopée ou le couvert forestier, la production de graines, le retour de la faune ou le contrôle des mauvaises herbes, la productivité, le rétablissement du cycle de nutriments) (Ghose, 2004). Généralement, le but ultime de la plupart des travaux de restauration est d'obtenir un écosystème autosuffisant et durable qui ne nécessite aucun ajout d'amendement et qui est résilient face aux différents types de perturbations. Selon les auteurs, les critères permettent de mesurer le succès de la restauration peuvent être basés que sur quelques critères ou sur une approche beaucoup plus intégrée qui inclut plusieurs types de variables (Ruiz-Jaen, 2005). La Society of Ecological Restoration International, a fourni une liste de neuf paramètres écologiques servant de lignes directrices pour évaluer le succès des travaux de restauration.

Ainsi, les sites restaurés devraient avoir les attributs suivants :

- 1- Une diversité et la structure de la communauté similaires au site de référence
- 2- La présence de plantes indigènes
- 3- La présence de groupes fonctionnels nécessaires à la stabilité à long terme
- 4- La capacité de l'environnement physique à soutenir des populations reproductives
- 5- Le fonctionnement normal d'un écosystème
- 6- L'intégration avec le paysage
- 7- Élimination des menaces potentielles
- 8- La résilience à des perturbations normales
- 9- L'auto-suffisance et la durabilité

Malgré que tous ces attributs fournissent une excellente évaluation du succès de la restauration, peu d'études ont les ressources financières pour évaluer tous ces paramètres. En plus, plusieurs de ceux-ci ont besoin d'être évalués pendant de nombreuses années et la plupart des programmes de suivi s'étendent sur environ cinq ans. Dans la pratique, la plupart

des études de suivi sont divisées en trois paramètres majeurs. Normalement, ces programmes misent sur la diversité, la structure de la végétation et sur les processus écologiques (Ruiz-Jaen, 2005). Premièrement, la diversité est habituellement mesurée en déterminant la richesse et l'abondance des espèces appartenant à différents réseaux trophiques. Cette mesure est d'ailleurs intéressante puisqu'elle permet d'obtenir une mesure indirecte de la résilience des écosystèmes. Deuxièmement, la structure de la végétation est normalement déterminée en mesurant le couvert végétal, la densité ou la biomasse. Ces mesures sont utiles pour prédire la direction de la succession des plantes et les processus écologiques tels que le cycle des nutriments et les interactions biologiques. Celles-ci sont importantes, car elles fournissent aussi de l'information sur la résilience des écosystèmes restaurés. Par exemple, le cycle des nutriments détermine la quantité et les types de composantes organiques et inorganiques qui sont disponibles pour les organismes. Le cycle des nutriments est normalement mesuré indirectement en estimant les disponibilités des nutriments. Troisièmement, le rétablissement des interactions biologiques est également critique pour les fonctions à long terme d'un écosystème restauré. L'évaluation de la diversité, de la structure de la végétation et des processus écologiques peuvent refléter la trajectoire de recouvrement d'un écosystème restauré autosuffisant et durable. En plus de l'évaluation de ces paramètres, ceux-ci doivent toujours être comparés avec les valeurs des sites de référence afin d'estimer les niveaux de succès de la restauration. Les sites servant de référence devraient être situés dans la même région, proches du site restauré et devraient être exposés aux mêmes perturbations naturelles. Également, il peut se produire des variations affectant les sites différemment. Il est donc conseillé d'utiliser plus d'un emplacement de référence pour évaluer la réussite de la restauration. Cependant, il est vrai que les coûts augmenteront si plus d'un lieu est choisi comme référence (Ruiz-Jaen, 2005).

Il faut donc se rappeler, pour atteindre la réussite de la restauration, d'autres paramètres plus généraux peuvent également être considérés. Puisque la réussite est basée sur le choix des objectifs de départ, on doit s'assurer que ceux-ci sont faisables techniquement, scientifiquement et socialement. L'atteinte de ces objectifs doit également se dérouler dans les délais alloués et en fonction des budgets accordés (Ruiz-Jaen, 2005).

Chapitre 6

Recommandations

Ce dernier chapitre aborde différentes recommandations basées sur les lectures et les constatations réalisées à partir des chapitres précédents. Ces recommandations sont rédigées sous forme de bonnes pratiques pour encourager les entreprises minières, les gouvernements et les communautés locales à saisir l'importance de travailler conjointement et à s'assurer d'intégrer le développement durable au travers des étapes du développement minier. Ce chapitre aborde d'abord l'importance de la planification pour assurer le succès des programmes de restauration. Ensuite, il souligne le besoin d'intégrer la conservation de la biodiversité par les entreprises minières. Puisque les travaux de restauration sont très dispendieux, il est essentiel de se soucier d'obtenir les ressources financières nécessaires afin de couvrir les coûts des travaux. De plus, les communautés locales autochtones et non autochtones doivent également être incluses dans les négociations pour s'assurer que les bénéfices offerts par les entreprises minières soient durables et accessibles pour les générations futures. Aussi, les gouvernements ont un rôle essentiel en lien avec l'extraction minière notamment en ce qui concerne tous les aspects liés à la législation de l'exploitation et de la restauration minière. Même si les ressources minérales sont des ressources non renouvelables, le développement durable peut être inclus au travers des activités minières. En dernier, l'importance de la prise en charge des sites orphelins est abordée.

6.1 Planification

La première recommandation soulevée est de prioriser l'organisation et la planification dans toutes les étapes du développement minier et surtout lors de la fermeture et de la restauration. En plus d'économiser des coûts, la planification permet de mieux diriger les travaux, optimiser le temps alloué et ainsi davantage garantir le succès de la restauration (World Bank et International Finance Corporation, 2002). Pour que la restauration écologique

soit une réussite, les étapes et les différents aspects doivent être traités de façon ordonnée et inclure des procédures et des pratiques orientées vers le succès. Malgré que les étapes et les pratiques demeurent les mêmes à la base pour tous les projets, celles-ci doivent être adaptées pour chacun des sites selon les particularités différentes que possède chaque écosystème à restaurer (Cooke et Johnson, 2002). De plus, une compréhension de base de la structure et les fonctions des écosystèmes avant les travaux permettent d'augmenter les chances de réussite des travaux de restauration. Il est donc important d'obtenir le plus de données possible pour orienter les choix et assurer le succès de rétablissement des écosystèmes (Ghose, 2004).

Les principales étapes que devraient contenir tous les plans de fermeture et de restauration sont présentées à la figure 6.1. La première étape sert à définir le but de la restauration, soit l'objectif principal visé par les travaux. Le but de la restauration est souvent de recréer un écosystème naturel similaire à celui de départ, mais peut également inclure des notions de durabilité ou, par exemple, d'exécuter les travaux selon le budget précis. Ensuite, les objectifs peuvent être traduits comme étant des objectifs spécifiques à chacun des attributs du site à restaurer. Ces objectifs doivent être clairs et basés sur les connaissances détaillées et sur les caractéristiques fonctionnelles de l'écosystème (Cooke et Johnson, 2002). Ainsi, le tableau 6.1 a été divisé en 7 attributs afin d'orienter les objectifs spécifiques. Une restauration utopique voudrait que tous ces attributs soient atteints, mais le contexte réaliste dans lequel sont réalisés les travaux demande que certaines considérations soient prises en compte comme la vitesse d'atteinte des objectifs et les coûts encourus par les travaux (Cooke et Johnson, 2002). Ainsi, la planification avant le début des travaux est primordiale pour décider d'objectifs qui soient également réalisables techniquement en fonction des ressources disponibles (Ginnocchio, 2004). De plus, les attributs prioritaires doivent être restaurés en premier et les autres en fonction des ressources financières et le délai disponible.

Pour ainsi être en mesure de quantifier le degré d'atteinte de ces objectifs, des critères mesurables doivent accompagner chacun des objectifs. Il est important que ces critères soient « SMART » (spécifique, mesurable, atteignables, réalistes et temporelles). En d'autres mots, ces critères doivent être spécifiques donc clairs et bien définis. Ensuite, ils doivent être

mesurables, selon la mesure que l'atteinte peut être évaluée. Ils doivent être atteignables soient réalisables en fonction des différentes contraintes budgétaires, temporelles et techniques. De plus, ils doivent être réalistes en fonction des priorités et finalement temporels selon les échéances disponibles (Environnement Canada, 2011c). Les buts et les objectifs doivent être ainsi être décidés dès le début des activités puisqu'ils influenceront directement toutes les étapes suivantes.

Tableau 6.1 Caractéristiques écosystémiques pour les considérations des objectifs de la restauration écologique.

1	Composition : la présence d'espèces et leur abondance relative
2	Structure : arrangement vertical de la végétation et les composantes du sol
3	Patron : arrangement horizontal des composantes de l'écosystème
4	Hétérogénéité : celle des composantes variables liées aux caractéristiques 1 à 3
5	Fonctions : la performance de processus de base des écosystèmes (cycle des nutriments, capture de l'énergie, la rétention de l'eau)
6	Interaction entre espèces : pollinisation, la dispersion de graines, etc.
7	Dynamique et résilience : succession et processus de transition

Traduction libre

Source : Cooke, J.A. et Johnson, M.S. (2002)

Ensuite, l'étape suivante est la gestion du sol pour lesquels il existe deux possibilités, soit d'utiliser le sol d'origine ou d'utiliser un substrat alternatif tel qu'expliqué à la section 4.4 du chapitre 4. La gestion du sol est d'ailleurs un des aspects les plus importants à considéré lors de la planification. Effectivement, celui-ci influencera directement la durée nécessaire pour exécuter les travaux de la restauration (Cooke et Johnson, 2002). Dans les cas où le sol n'a pas été conservé, des défis majeurs concernent l'interaction plante-substrat. L'accent doit d'abord être mis sur l'évaluation des facteurs qui affectent la colonisation des plantes et leur établissement ainsi que l'évaluation du succès de l'établissement des plantes (Ginocchio et Baker, 2004). Après, les étapes suivantes sont la végétalisation, soit la sélection des espèces

et de leur établissement, les amendements nécessaires et les apports en nutriments. L'avant-dernière étape est celle de la gestion adaptative. Malgré que les végétaux soient bien établis, il peut survenir des problématiques non prévues une fois l'établissement terminé tel que des besoins de replantation à certains endroits ou des problématiques liées aux ravageurs. C'est pourquoi il faut prévoir des imprévus et adapter les solutions en fonction des différentes problématiques. La dernière étape est celle des méthodes de suivi et d'évaluation du succès. Cette étape nécessite alors de reprendre les critères établis au départ et d'évaluer si ceux-ci ont été atteints ou non (Cooke et Johnson, 2002). Pour ceux qui n'ont pas été atteints, il peut s'avérer être très utile d'en trouver les raisons afin d'améliorer les techniques utilisées et les appliquer pour les travaux de restauration futurs.

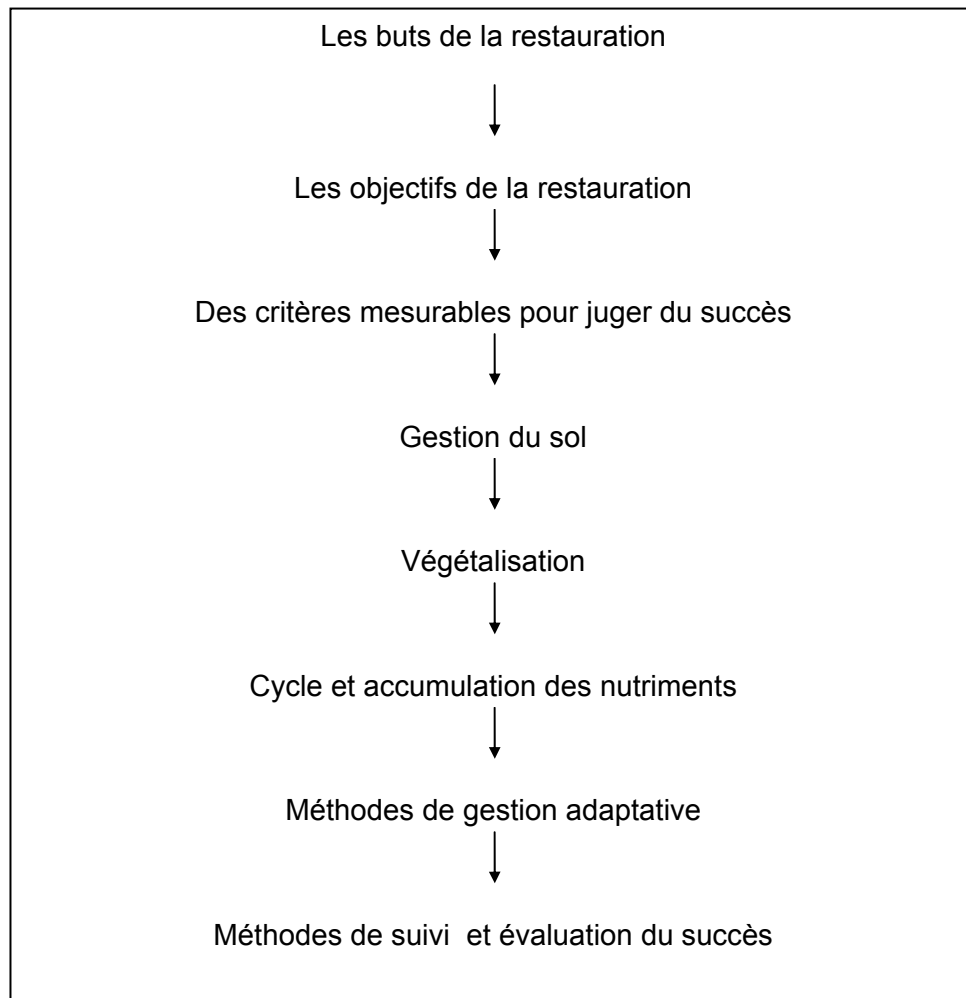


Figure 6.1 Étapes de la planification conceptuelle de la restauration écologique

Traduction libre

Source : Cooke, J.A. et Johnson, M.S. (2002)

On devrait toujours se rappeler que la planification de la restauration est spécifique à un site en particulier et que les connaissances de base en écologie jouent un rôle important et critique pour assurer le succès de la restauration (Ginocchio et Baker, 2004).

Tous les aspects importants de la planification se retrouvent d'ailleurs dans le plan de fermeture qui est normalement exigé lorsqu'une législation détaillée de l'exploitation minière est présente. Celui devrait d'ailleurs être remis dès l'obtention de l'autorisation de procéder à l'ouverture de la mine en question. La remise du plan en début de la planification peut avoir plusieurs bénéfices tels qu'influencer la technologie et le choix de disposition des rejets avant le début des opérations d'extraction. Ce choix permettra de concilier les activités d'opération à celles de la restauration et sauver des coûts sur la totalité de la durée de vie de la mine. De plus, il permettra de mieux planifier le transfert des initiatives ou des infrastructures entreprises par l'opérateur de la mine pour que le gouvernement puisse en prendre soin à perpétuité (World Bank et International Finance Corporation, 2002).

6.2 Conservation de la biodiversité

La conservation de la biodiversité est un concept important intégrant l'industrie minière étant donné que bien souvent l'extraction des minerais et des métaux est exercée dans des endroits qui ont été très peu affectés par des perturbations anthropiques dans le passé (International Council on Mining and Metals, 2006). Tel que mentionné dans le chapitre 2, l'industrie minière est un secteur d'activité causant des dommages significatifs aux écosystèmes et à l'environnement. En effet, lors des opérations de rasage et d'excavation du sol, une portion du territoire est complètement détruite entraînant à la fois la disparition de la biodiversité présente à cet endroit. Ainsi, plusieurs années à la fin des opérations peuvent être nécessaires pour permettre au site de regagner une allure naturelle sans nécessairement retrouver la même richesse en termes d'espèces présentes au départ. D'ailleurs, selon les Services de la faune et des Parcs nationaux d'Australie, l'industrie minière est responsable de 1,1 % de présumées extinctions d'espèces floristiques en danger (Ginocchio et Baker, 2004).

De nos jours, les entreprises responsables sont aptes à prédire les impacts causés à l'environnement et sont capables de les minimiser ou de les atténuer. Par exemple, certaines initiatives peuvent être prises de ne pas excaver ou de protéger les sections du site possédant une haute diversité biologique. Pour les impacts inévitables touchant la biodiversité, il est recommandé que les entreprises compensent pour ces pertes. Il est possible pour les entreprises de participer de plusieurs façons par des investissements, de contribuer au développement des communautés locales ainsi qu'à la conservation de la biodiversité (International Council on Mining and Metals, 2006). Ces initiatives incluent des inventaires de la faune et de la flore, du support aux programmes de gestion des aires protégées, etc. De plus, certaines entreprises ont également développé des partenariats avec des groupes de conservation locaux pour collaborer à la conservation de la biodiversité (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources et International Council on Mining and Metals, 2004). Les entreprises peuvent compenser également en investissant dans des secteurs connexes tels que la santé et l'éducation pour aider au développement régional (International Council on Mining and Metals, 2006).

Les plantes tolérantes aux métaux sont souvent endémiques à des endroits possédant naturellement de hautes concentrations en métaux comme au-dessus des gisements ou sur d'anciens sites abandonnés miniers. Tel que déjà mentionné, ces plantes sont souvent limitées géographiquement à une région en particulier. Ainsi, l'industrie minière est souvent responsable à elle seule d'extinction de métallobytes puisque que ces plantes poussent près ou sur des dépôts miniers. Malheureusement, la disparition de ces cultivars est une perte de ressources précieuses, qui pourraient être utilisées par l'industrie minière, comme bonne pratique pour la restauration de sites miniers puisqu'elles présentent un immense potentiel pour la phytorestauration (Ginocchio et Baker, 2004).

Ainsi, la conservation de la biodiversité est un défi clé pour promouvoir le développement durable au sein de l'extraction minière. En effet, dans le passé trop d'entreprises n'ont pas été responsables dans leurs actions. Les communautés locales accordent une très grande importance culturelle et possèdent de liens étroits avec leur environnement. Le rôle des entreprises est donc de s'assurer de ne pas laisser derrière un héritage affecté par les

activités minières pour les générations futures (International Council on Mining and Metals, 2006). Enfin, les investissements contribuent à la prospérité de ces régions souvent affectées par la pauvreté.

6.3 Garanties financières

L'étape de la restauration dans le processus minier est l'étape la plus importante pour éviter de laisser derrière un héritage d'écosystèmes détruits. Malgré que cette étape s'avère essentielle pour redonner une allure naturelle au site, elle peut également être extrêmement dispendieuse. Le coût engendré par la fermeture d'une mine peut varier considérablement selon l'âge de la mine, sa localisation, le type d'exploitation et le minerai ou métal extrait ainsi que différentes caractéristiques telles que la taille de la mine et de ses infrastructures, le volume de rejets, l'historique de la gestion environnementale sur le site et selon les caractéristiques géologiques qui peuvent être une source de drainage minier. Plus précisément, les montants associés à la fermeture et à la restauration d'une mine peuvent varier de moins de 1 million \$ pour les très petites mines jusqu'à plusieurs centaines de millions pour les très grandes mines. Généralement, ceux-ci se situent dans les dizaines de millions de dollars (World Bank et International Finance Corporation, 2002). Ainsi, les coûts nécessaires à la fermeture complète du site ont donc besoin d'être continuellement estimés et mis à jour pour s'assurer que les fonds nécessaires seront présents lors du moment venu de procéder à la fermeture du site.

Normalement, le principe du pollueur-payeur s'applique et les entreprises doivent assumer seuls ces sommes, en plus que plusieurs pays en développement n'ont pas les ressources financières pour défrayer les coûts associés à la restauration de sites miniers. Cependant, cette affirmation dépend de la législation en vigueur où il est normalement expliqué les rôles et les responsabilités des parties prenantes en regard avec cette fermeture. Il peut également y avoir des arrangements particuliers ou des ententes entre l'entreprise et le gouvernement ou la communauté que l'entreprise n'assume que partiellement les frais liés à la fermeture du site (World Bank et International Finance Corporation, 2002). Cependant, ces montants ont

tendance à être significativement plus bas lorsque l'entreprise en prend la responsabilité du fait qu'elle est déjà familière au site et il est possible pour elle d'utiliser le personnel et l'équipement déjà sur place.

Dans les cas où les mines ont été abandonnées, les coûts associés à la fermeture du site dans les pays en développement et quelques cas dans les pays développés ont été la responsabilité des gouvernements puisque le montant accumulé pendant la durée de vie de la mine n'était pas assez élevé pour couvrir tous les frais engendrés. Dans ce cas, l'État doit donc assumer l'entière responsabilité de restaurer le site. Cependant, dans les pays très pauvres, l'État doit combler des besoins plus critiques et certains sites restent à jamais non restaurés (World Bank et International Finance Corporation, 2002).

Pour avoir les fonds nécessaires lors de la fermeture du site, il est recommandé de procéder à des estimations périodiques étant donné les imprévus qui peuvent faire fluctuer le prix total. Les fonds initiaux devraient être calculés durant le début des opérations de la mine et devraient être mis à jour régulièrement, par exemple, tous les cinq ans pour une mine de 30 ans et tous les deux ans pour une mine de 10 ans. De plus, si la mine est progressivement restaurée, les coûts nécessaires à la fin des opérations devraient être beaucoup moindres. Dans le passé, plusieurs entreprises ont sous-évalué les coûts engendrés par la restauration du site minier (World Bank et International Finance Corporation, 2002). Ainsi, les sommes devraient toujours être mis à jour basé sur les données les plus récentes, la technologie disponible, les obligations légales et prendre en compte les changements dans la communauté et non seulement actualiser les coûts en fonction de l'inflation. Cependant, la précision des estimés peut être complexée par des changements imprévisibles pendant la durée de vie de la mine.

Habituellement, la première année d'exploitation d'une mine, elle fait rarement des profits, car les nombreux frais encourus par l'ouverture de la mine sont engendrés. Ainsi, les entreprises sont souvent peu enclines à mettre de grosses sommes de côté pour la restauration en début d'opération. Une des approches à utiliser est donc de mettre un montant déterminé de manière constante en fonction des années de vie de la mine pour obtenir la somme nécessaire à la fermeture de la mine pour couvrir tous les frais (World Bank et International

Finance Corporation, 2002). Ainsi, plusieurs options ont été développées afin de certifier aux gouvernements et aux communautés que les entreprises respecteront leurs engagements même si finalement elles ferment plus tôt que prévu. Plusieurs options financières sont possibles et chacune est plus appropriée en fonction de circonstances spécifiques telles que la capacité financière de l'entreprise, le potentiel de responsabilité environnemental ainsi que les délais disponibles (International Council on Mining and Metals, 2005). Ces instruments incluent les garanties d'une tierce partie, le dépôt monétaire, les lettres de crédits, les fonds de fiducies, les polices d'assurance et les options dites douces (Tableau 6.2). Une attention particulière doit également être mise pour les coûts relatifs à la post-fermeture qui peuvent s'avérer être très élevés. Notamment pour les cas de DMA, des dépenses annuelles de 10 millions de dollars peuvent être nécessaires à perpétuité pour contrôler le problème (World Bank et International Finance Corporation, 2002).

Tableau 6.2 Options financières possibles pour couvrir les frais liés à la fermeture

Options	Description	Avantages	Inconvénients
Garantie d'une tierce partie	Inclus des garanties et des assurances sans condition.	Relativement peu dispendieux (entre 1 % et 1,5 %). Les fonds sont toujours disponibles par les institutions bancaires. Il est également transparent. Il peut être modifié selon les nouvelles obligations.	Souvent considéré par les institutions comme faisant partie des capitaux obtenus et réduit ainsi les fonds disponibles.
Dépôt monétaire	Normalement déposé par le gouvernement et accepté pour les petites opérations.	Seul le gouvernement possède le contrôle sur les fonds et a la responsabilité sur la disponibilité des fonds.	Fournir les fonds en avance est un obstacle financier étant donné que les intérêts encourus peuvent être une source de diminution de fonds. Si l'opérateur fait faillite, l'argent peut être considéré comme un actif et être disponible pour les créanciers. Les gouvernements doivent s'assurer que les fonds

			sont destinés aux usages prévus.
Lettre de crédit	Une forme de garantie qui possède normalement un terme d'un an et peut être prolongée selon l'évaluation de l'émetteur.	Relativement peu dispendieux pour l'opérateur à établir.	Peut être retiré par l'émetteur à la fin du terme Peut restreindre l'accès à l'entreprise à d'autres formes de crédits.
Fonds de fiducie	Administré par une tierce émettrice selon une politique définie d'investissement Intentionné pour couvrir les coûts d'un plan de fermeture.	Les fonds sont visibles par le gouvernement et le public. Tous les surplus retournent à l'opérateur.	Une période de transition est nécessaire pour permettre à l'opérateur d'amasser les fonds nécessaires. Des obligations administratives peuvent être fastidieuses.
Police d'assurance	Plusieurs juridictions jugent cette méthode acceptable, cependant il n'existe aucun exemple où elle a été implantée.	Relativement peu dispendieuse pour l'opérateur. Demande moins d'obligations administratives que les fonds de fiducies.	Seulement valide si les primes sont versées annuellement. Si l'opérateur n'est plus en mesure de payer la prime, il doit avoir recours à des assurances financières.
Options douces	Ces options incluent : la cote de solidité financière, l'auto-financement, les tests financiers, des garanties corporatives basées sur le grade financier, des garanties provenant de sociétés mères, le nantissement d'actifs, etc.	N'inclus pas des coûts directs. Ils sont relativement peu dispendieux pour l'opérateur.	Ne fourni pas le même niveau de sécurité que les autres formes de garanties plus formelles.

Traduction libre

Source : International Council on Mining and Metals (2006)

Les gouvernements peuvent décider de mettre de côté des fonds pour l'investissement dans la région minière ainsi que dans la communauté pendant la durée de vie de la mine. Ses allocations peuvent être comprises comme étant des manières de compensation, soit pour

les coûts des opérations minières en termes de perturbations sociales ainsi que d'autres préoccupations locales. En même temps, les allocations peuvent avoir l'objectif spécifique de construire une base pour le développement économique futur en ayant en tête la fin de vie de la mine. D'un autre côté, le gouvernement peut décider d'encourager les entreprises à démarrer des investissements similaires dans la région. Ceci peut se faire en autorisant des réductions de taxes pour les entreprises minières qui investissent dans des infrastructures physiques ou sociales ou même des services. Cette méthode est particulièrement utile dans les pays en développement lorsque le secteur privé fournit souvent des infrastructures et des services sociaux à la région minière comme le transport, l'énergie, la santé et l'éducation qui sont normalement offerts par le secteur public dans les régions développées (World Bank et International Finance Corporation, 2002).

Les pays peuvent trouver des ressources financières manquantes via les institutions bancaires internationales (le Fonds mondial international et la Banque mondiale) pour les aider dans la planification et la préparation de la fermeture de sites miniers. Ils peuvent également aider les gouvernements dans leurs efforts pour la fermeture en lien avec l'atténuation des impacts sociaux, la planification et la reprise économique régionale (World Bank et International Finance Corporation, 2002).

Concernant le Québec, les entreprises sont dans l'obligation de fournir 70 % du montant des coûts anticipés pour l'exécution des travaux de restauration et fermeture du site minier. Le Québec se montre également exemplaire en présentant un nouveau projet de loi, soit le projet de Loi 14, afin d'élever à 100 % le dépôt exigé 3 ans après l'ouverture de la mine pour couvrir les coûts associés à la restauration et le réaménagement des aires d'accumulation (Assemblée nationale, 2011). Quant au Pérou, les montants nécessaires afin de couvrir les frais liés à la réalisation complète du plan de fermeture sont déjà exigés.

6.4 Implication des communautés locales

L'implication des communautés dans toutes les étapes du développement minier s'avère être extrêmement importante en vue de certifier que les entreprises agissent de manière

responsable et pour obtenir l'acceptabilité sociale des habitants résidant dans les communautés à proximité. La consultation avec la collectivité locale avant le début des travaux apporte plusieurs avantages. D'abord, la consultation permet de relier les attentes des communautés à celles des entreprises en combinant leurs connaissances et leur expertise. Ainsi, l'implication des communautés locales mène à des prises de décision conjointes et favorise la construction d'infrastructures durables qui concilient les besoins de travailleurs à ceux des habitants des environs (World Bank et International Finance Corporation, 2002). Par conséquent, les entreprises participent également à la prospérité de la région même une fois la mine fermée. Il est primordial que les entreprises assurent le transfert des responsabilités, pour que les services implantés demeurent encore actifs. En intégrant activement les communautés aux négociations, les entreprises favorisent l'entente sur les différentes mesures d'atténuation prévues ainsi que sur le suivi nécessaire une fois l'extraction terminée (International Council on Mining and Metals, 2006). De plus, il est recommandé d'inclure la collectivité dans les discussions concernant les objectifs de la restauration, car se sont eux qui utiliseront et profiteront du territoire une fois la restauration terminée (International Council on Mining and Metals, 2006).

Les communautés locales sont également les mieux positionnées pour assurer la gestion de leur propre développement économique. Cependant, il arrive quelques fois que celles-ci deviennent totalement dépendantes de la mine pour leurs biens et services. Ceci peut être expliqué par le fait que plusieurs personnes quittent leurs emplois pour travailler à la mine puisque les salaires offerts sont souvent beaucoup plus élevés. Cette dépendance est augmentée lorsque la collectivité est maintenue dans le noir à propos des activités présentes et futures de la mine les empêchant de planifier d'avance leur sort. Leur rôle est donc de travailler conjointement avec les entreprises pour empêcher le plus possible cette dépendance et le risque de conduire à l'écrasement économique de la région. Dans les cas où cette dépendance est déjà présente, les communautés doivent travailler activement avec les entreprises minières et les différents niveaux de gouvernement afin de mettre en place certaines mesures pour diminuer cette dépendance et augmenter leur autosuffisance (World Bank et International Finance Corporation, 2002).

De plus, une attention spéciale devrait être octroyée aux communautés autochtones. Pour la majorité, elles continuent de vivre selon un style de vie traditionnel et possèdent certains droits spécifiques notamment en ce qui concerne les activités de chasse et de pêche. Conséquemment, ces groupes particuliers devraient également faire partie des négociations pour s'assurer de respecter leurs droits et leurs traditions. Des négociations s'avèrent donc utiles pour éviter d'utiliser certaines zones qui sont considérées sacrées ou spirituelles (International Council on Mining and Metals, 2006). C'est pourquoi les communautés autochtones devraient également être impliquées dans les étapes du développement minier. Au Québec, la Convention de la Baie-James et du Nord québécois est une excellente initiative pour assurer le respect des droits des peuples autochtones concernant tous les projets affectant le développement de leur territoire (Convention de la Baie-James et du Nord québécois, 1975). Cependant, cette convention possède des lacunes, c'est pourquoi il existe en plus d'autres ententes particulières entre les communautés autochtones et les entreprises.

6.5 Rôle des gouvernements et importance de la législation

La gouvernance est un des éléments clés pour favoriser une extraction minière responsable et équitable pour toutes les parties prenantes impliquées. Les gouvernements possèdent plusieurs rôles dont celui de veiller à ce que les activités minières se déroulent de façon responsable. Ils peuvent également initialiser la planification économique de la région avec les autres parties prenantes. Ils ont également le rôle d'assurer qu'une partie des garanties financières provenant de l'extraction soit transférée aux communautés pour la construction d'infrastructures sociales. Une autre fonction est celle de réviser les plans de fermeture et de restauration et de demander des rectifications au besoin. Ce sont eux qui livrent les permis nécessaires à l'exécution de différents travaux et d'assurer qu'une gestion environnementale est réalisée durant les travaux (World Bank et International Finance Corporation, 2002).

Le plus important rôle des gouvernements est de garantir que le cadre législatif en vigueur couvre tous les aspects relatifs à l'extraction et à la restauration minière étant donné que les obligations des entreprises minières découlent directement du cadre législatif en vigueur

(World Bank et International Finance Corporation, 2002). Ainsi, ce cadre de législation doit comprendre plusieurs principes. D'abord, celui-ci doit favoriser la participation de tous les acteurs pour s'assurer d'une prise de décision efficace et équitable. Ce cadre doit également promouvoir un système démocratique efficace qui laisse place aux compromis et le pouvoir doit être réparti de façon juste et équilibrée pour éviter qu'il soit concentré au même endroit. La transparence est également un concept important pour permettre aux parties prenantes d'avoir accès à toute l'information utile à une prise de décision éclairée. Conséquemment, la prise de décision et les actions pourront être basées sur une analyse détaillée de la situation (International Institute for Environment and Development and World Business Council for Sustainable Development, 2002a). Lorsque ses principes ne sont pas respectés, de nouvelles institutions ont besoin de naître pour être mesure d'assurer leur intégration.

Cette prise de décision est extrêmement importante concernant plusieurs aspects de la restauration notamment pour obtenir l'acceptabilité sociale. Notamment, elle sert à obtenir un consensus sur les buts et les objectifs des travaux de restauration. Ainsi, différentes approches stratégiques peuvent être utilisées comme de définir les rôles et les responsabilités de chacun (International Institute for Environment and Development and World Business Council for Sustainable Development, 2002a). Des processus démocratiques équitables et détaillés dans la législation responsabilisent alors les personnes impliqués dans les choix de décisions qui les concernent. Une telle législation favorise également des structures légales et politiques qui garantissent la reconnaissance des droits civils chez les membres de la communauté (International Institute for Environment and Development and World Business Council for Sustainable Development, 2002a). Un cadre légal clair et détaillé permet ainsi d'assurer l'engagement et la responsabilité des entreprises et des corporations face à leurs actions, puisque des recours légaux sont permis lorsque les obligations législatives ne sont pas respectées. Un manque de précision au sein de législation peut mener à des inefficacités et à des confusions au sein de différents ministères et différents paliers gouvernementaux à savoir les responsabilités et autorités de chacun. Dans ce cas, il risque d'y avoir des manquements au niveau de la fermeture et du suivi. Cette situation est encore plus importante pour les pays possédant un gouvernement décentralisé où il y a un risque encore plus fort de confusion (World Bank et International Finance Corporation, 2002).

Un cadre légal et réglementaire devrait toujours clarifier les enjeux relatifs à la fermeture d'une mine. En effet, les procédures liées à cette fermeture, les obligations et les standards environnementaux, ainsi que les responsabilités et les autorités de chaque institution devraient y être. Ce cadre devrait également prévoir des règles pour engendrer des consultations efficaces et pertinentes avec les communautés locales durant la planification et la préparation de la fermeture de la mine. Finalement, le cadre législatif devrait obliger des mises à jour régulières du plan de fermeture pendant la durée de vie de la mine et décrire les différentes options acceptées pour fournir des fonds nécessaires pour couvrir les frais encourus par sa fermeture (World Bank et International Finance Corporation, 2002).

6.6 Intégration du développement durable

Par conséquent, toutes les recommandations mentionnées s'inscrivent dans une perspective plus large de développement durable. Le principe général est de veiller à ce que le secteur minier contribue au bien-être humain sans compromettre ou réduire celui des générations futures (International Institute for Environment and Development and World Business Council for Sustainable Development, 2002a). Malgré que les ressources métalliques et minérales ne sont pas renouvelables, il est quand même possible pour les entreprises minières de participer à la mise en place de mesures concrètes afin d'appliquer des principes du développement durable pendant les phases du développement minier et surtout pendant la restauration. Elles peuvent ainsi participer à la transition des communautés vers le développement durable dans des endroits où les principes sont peu appliqués (Hilson, 2001).

C'est donc en travaillant conjointement que les entreprises minières, les gouvernements et les communautés peuvent coopérer pour diminuer les effets négatifs liés à l'extraction minière et maximiser les opportunités offertes (World Bank et International Finance Corporation, 2002). Ces parties prenantes doivent donc intégrer les différentes sphères du développement durable soient les activités économiques, les préoccupations sociales et environnementales ainsi qu'un système de gouvernance efficace (International Institute for Environment and Development and World Business Council for Sustainable Development,

2002a). On maximise les retombées pour la génération actuelle en redistribuant de manière équitable les profits et les bénéfices sans compromettre la possibilité des générations futures de subvenir à leurs besoins.

Par exemple au Québec, il existe une chaire de recherche intitulée « Chaire industrielle sur l'environnement et la gestion des rejets miniers » qui regroupe les gens de l'industrie minière, certains ministères provinciaux et quelques établissements d'enseignement (Chaire industrielle CRSNG Polytechnique - UQAT sur l'environnement et la gestion des rejets miniers, 2007). Ce regroupement permet le partage des connaissances pour améliorer la recherche sur la gestion des résidus miniers. Ce type de regroupement pourrait être un exemple pour les pays en développement pour perfectionner leurs techniques de maniement des aires d'accumulation.

Cependant, les concepts entourant le développement durable ont évolué différemment selon les enjeux que possèdent chaque pays. Cette différence est surtout visible entre les pays du Sud et du Nord. En effet, la réduction de la pauvreté est un défi extrême pour les pays en développement et émergents. Presque la moitié de la population mondiale, soit autour de 2,8 milliards de personnes vivent avec moins de 2 \$ par jour. Malgré le fait que la croissance économique de certaines régions du monde est en hausse, celle-ci varie énormément d'un continent à l'autre. L'Asie a démontré des progrès considérables comparativement à l'Amérique latine et à l'Afrique. Des défis plus importants affectent les pays pauvres limitant l'intégration du développement durable au sein de leurs procédures et législation (Institute for Environment and Development and World Business Council for Sustainable Development, 2002a).

Un autre enjeu important est la grande consommation de ressources. Cette préoccupation provient de la population toujours croissante, toujours en demande grandissante de nouvelles ressources. Il est maintenant clair que le développement économique, faisant abstraction aux impacts environnementaux et sociaux, peut conduire à d'autres conséquences désastreuses telles que la perte de biodiversité, la perte de l'intégrité des écosystèmes et des modifications au niveau du climat (International Institute for Environment and Development and World Business Council for Sustainable Development, 2002a). Notons que pour réellement intégrer

la durabilité dans l'industrie minière, il s'agit d'intégrer des principes de gestion des matières résiduelles telle que la réutilisation, la valorisation, le recyclage et la réduction pour diminuer la quantité de minerais extraits et ainsi en limiter les impacts.

Le développement durable intègre plusieurs concepts tels que diminuer de la production de rejets miniers et encourage une utilisation efficace des minéraux et métaux. Il faut également les extraire de manière durable, promouvoir la réutilisation, la valorisation et le recyclage des minéraux et des métaux et encourager les bonnes pratiques de travail pour l'améliorer la qualité générale de l'environnement, une fois l'extraction terminée (Bhattacharya, 2000).

6.7 Prise en charge des sites orphelins

Les sites orphelins sont généralement d'anciennes mines qui ont appartenu à des entreprises minières qui ont disparu, qui n'existent plus ou qui ont tout simplement déménagé hors du pays. Conséquemment, les gouvernements sont ceux qui héritent de la responsabilité de la restaurer adéquatement. Ces sites sont retrouvés dans toutes les régions où il y a un historique d'activités minières. Historiquement, il était commun dans la pratique de quitter les sites sans se soucier de la restauration après avoir extrait tout le minéral ou le métal désiré. Ces sites étaient la source de graves problèmes environnementaux puisqu'ils étaient laissés sans végétation. Aujourd'hui, ces lieux sont une préoccupation tout à fait différente (International Institute for Environment and Development and World Business Council for Sustainable Development, 2002b).

En effet, ces sites manifestent une grande part des impacts décrits lors de l'extraction minière. Ces sites exposent un paysage et des écosystèmes détruits à très long terme. Il y a toujours le risque de contamination du milieu terrestre, aquatique et aérien en plus des espèces qui pourraient entrer en contact avec les substances toxiques se dégageant de ces lieux. Des problèmes sociaux peuvent amener, avec la présence de terres non utilisables, des problèmes de santé possibles (Chilean Copper Commission et United Nations Environment Programme, 2001).

Il est primordial que la législation soit détaillée et contraignante pour obliger les entreprises à présenter un plan de fermeture adéquat et complet au gouvernement et ainsi garantir une fermeture responsable. Il est également recommandé que le gouvernement des pays possédant un historique d'abandon de mines s'assure de répertorier tous les sites orphelins et d'établir un plan d'action pour les restaurer. Cette étape peut s'avérer être extrêmement dispendieuse, il est alors recommandé de seulement adresser les impacts environnementaux les plus dommageables en attendant d'avoir les ressources financières nécessaires pour procéder à la restauration complète.

Au Québec, il est estimé qu'il existe un répertoire de plus de 1 000 sites abandonnés où il y a au moins une composante de la mine qui a été abandonnée. De plus, il est évalué qu'il se dénombre environ 100 sites orphelins d'entreposage de rejets qui occupent une superficie de plus de 1000 hectares. Les montants associés à la restauration de ces sites s'élèvent à environ 75 à 100 millions de dollars (Bussière *et al.*, 2005). Afin de prendre en charge ces lieux, le gouvernement du Québec, tout comme les représentants du gouvernement canadien et des autres provinces, de l'industrie minière, des organismes environnementaux et des peuples autochtones font partis du Comité national de consultation qui possède le mandat de mettre en œuvre des programmes de restauration des sites miniers orphelins (National Orphaned/Abandoned Mines Initiative, s.d.). Ce groupe de travail a été formé en lien avec l'Initiative nationale pour les mines orphelines ou abandonnées qui possède l'objectif de définir les enjeux, les problématiques, les défis et les opportunités associés à leur restauration au Canada (National Orphaned/Abandoned Mines Initiative, 2003). Ce groupe de travail est donc un exemple de la manière concrète dont les sites orphelins peuvent être pris en charge et qui rassemble plusieurs les acteurs touchés du milieu.

Conclusion

La restauration écologique est une étape essentielle du processus minier accompagnant les fermetures de sites miniers. Il est prévu que plusieurs grands chantiers miniers situés dans les pays en développement fermeront leurs portes très bientôt d'où l'importance de s'attarder à cette phase. Cependant, certains pays ont accumulé un historique de sites abandonnés dû au fait que leur législation n'était pas assez contraignante ou détaillée pour obliger les entreprises à procéder à une fermeture responsable. Également, pour assurer le succès du programme de restauration, plusieurs éléments essentiels doivent être intégrés lors de la végétalisation. Il existe plusieurs méthodes d'y procéder, cependant, certains choix réalisés au début des activités peuvent avoir des incidences sur le temps et sur les ressources financières nécessaires à l'accomplissement de la restauration complète du site. Ainsi, l'essai avait pour objectif d'analyser les différentes méthodes utilisées pour procéder à la végétalisation lors de la restauration écologique de sites miniers et procéder à la comparaison entre le Québec et le Pérou pour en exposer les principales différences par rapport aux exigences contenues dans leur législation.

L'essai a permis de conclure que plusieurs pays en développement doivent actualiser leur législation entourant l'extraction minérale et la restauration de sites miniers tels que l'a fait le Pérou. En comparant leur législation avec celle du Québec, il a été constaté que certains aspects sont même plus exigeants et détaillés. Cependant, pour assurer le succès de la végétalisation, plusieurs aspects doivent être inclus et pris en compte. La variable la plus importante est la conservation de la qualité du sol présent avant le début des opérations de décapage. En effet, le substrat d'origine est l'élément qui influencera directement le degré de succès du programme de végétalisation.

Cependant, pour réellement assurer le succès de la restauration et certifier que les étapes du processus minier se dérouleront de manière responsable dans les pays en développement, plusieurs autres éléments rédigés sous forme de bonnes pratiques doivent être pris en considération. D'abord, la planification est l'élément clé pour réellement mener à la réussite

de la restauration qui se décrit par une utilisation optimale des ressources disponibles. De plus, l'intégration de la conservation de la biodiversité est également suggérée pour notamment aider à protéger certaines plantes utiles à la phytorestauration. Ensuite, il est essentiel de garantir que des ressources financières suffisantes seront accessibles pour couvrir les coûts élevés encourus par les travaux de restauration et de végétalisation des sites miniers. D'ailleurs, plusieurs options existent possédant chacune ses avantages et ses inconvénients. Pour obtenir l'acceptabilité sociale et s'assurer que les services et infrastructures mis en place seront accessibles pour les générations futures, les communautés locales doivent faire partie des négociations qui les impliquent. Cependant, les gouvernements doivent assumer leurs rôles, dont le plus important, est d'assurer un niveau de précision élevé de leur cadre législatif concernant l'extraction et la restauration minière. Ainsi, ils doivent vérifier que la législation en vigueur oblige les communautés à être consultées et impliquées dans les décisions concernant leur territoire. Une autre des recommandations est d'intégrer le développement durable au travers des activités minières malgré qu'il peut l'être difficile pour les pays en développement étant donné que des problématiques plus critiques ont souvent besoin d'être adressées. Pour finir, les gouvernements doivent élaborer des plans d'action pour assurer la prise en charge des sites orphelins laissés derrière par d'anciennes entreprises.

Liste de références

Agence canadienne d'évaluation environnementale. (2011). James Bay and Northern Quebec Agreement. <http://www.ceaa.gc.ca/default.asp?lang=En&n=258F8153-1>. 9 novembre 2011.

Alcoa. (2011). Topsoil and overburden removal, http://www.alcoa.com/australia/en/info_page/mining_topsoil.asp. 30 novembre 2011.

Assemblée nationale. (2011). Projet de loi no 14, Loi sur la mise en valeur des ressources minérales dans le respect des principes du développement durable. Présenté par M. Serge Simard, Ministre délégué aux Ressources naturelles et à la Faune, Éditeur officiel du Québec.

Bhattacharya, J. (2000). Sustainable development of natural resources : implications for mining of minerals. *Miner. Resour. Eng.* 9, 451-464.

British Columbia Wild and Environmental Mining Council of British Columbia. (2006). Acid Mine Drainage : mining and water pollution issues in British Columbia. http://www.miningwatch.ca/sites/www.miningwatch.ca/files/amd_0.pdf. 19 octobre 2006.

Bradshaw, A. (2000). The use of natural processes in reclamation – advantages and difficulties. *Landscape Urban Plan.* 51, 89-100.

Bradshaw, A.D et Chadwick, M.J. (1980). The restoration of land : the ecology and reclamation of derelict and degraded land (Berkeley et Los Angeles : Université de Californie).

Braun, P. (2008). Question et réponses sur le « miracle » rouge brun. *Electrolan Sa Journal* 2, 6-9.

Bureau d'audiences publiques sur l'environnement. (2012). BAPE, description des services et des programmes. <http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/bape/index.htm>. 15 janvier 2012.

Bussière, B., Aubertin, M., Zagury, G.J., Potvin, R., et Benzaazou, M. (2005). Principaux défis et pistes de solutions pour la restauration des aires d'entreposage de rejets miniers

abandonnés. http://web2.uqat.ca/crcbussiere/ATMineAbandonn%C3%A9esBussiereetal_MA-BB-MB-RP-GJZ_.pdf. 16 novembre 2011.

Chaire industrielle CRSNG Polytechnique - UQAT sur l'environnement et la gestion des rejets miniers. (2007). Partenaires de la chaire. http://www.enviro-geremi.polymtl.ca/SitePhaseII/PhaseII_Cadre.htm. 18 janvier 2012.

Chilean Copper Commission et United Nations Environment Programme. (2001). Abandoned mines : problems, issues and policy challenges for decision makers, summary report. http://www.sosbluewaters.org/abandoned_report.pdf. 8 janvier 2012.

Clark, A.L. et Clark, J.C. (2005). An international overview of legal frameworks for mine closure. http://web.idrc.ca/uploads/user-S/11198931391clark_jcclark.pdf3.2. 10 novembre 2011.

Congreso de la Republica de Perú. (2010). La Ley del derecho a la consulta previa a los pueblos indígenas u originarios reconocido en el convenio n°169 de la Organización Internacional del Trabajo. http://servindi.org/pdf/Peru_LeyConsulta_aprobada.pdf. 15 janvier 2012.

Convention de la Baie-James et du Nord québécois. 1975). La Convention de la Baie-James et du Nord Québécois. <http://www.gcc.ca/pdf/LEG000000006.pdf>. 10 octobre novembre 2011.

Cooke, J.A. et Johnson, M.S. (2002). Ecological restoration of land with particular reference to the mining of metals and industrial minerals: A review of theory and practice. *Environ. Rev.* 10, 41-71.

Donoghue, A.M. (2004). Occupational health hazards in mining : an overview. *Occup. Medic.* 54, 283-289.

Environnement Canada. (2011a). Code de pratiques écologiques pour les mines de métaux. <http://wormwatch.ca/lcpe-cepa/default.asp?lang=Fr&n=CBE3CD59-1&offset=3&toc=show>. 2 novembre 2011.

Environnement Canada. (2011b). Erosion and sedimentation. <http://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=En&n=32121A74-1>. 25 octobre 2011.

Environnement Canada. (2011c). Mesure des résultats. <http://www.ec.gc.ca/dd-sd/default.asp?lang=fr&n=FE4918AA-1>. 7 janvier 2012.

Environmental Law Alliance Worldwide. (2011). Généralités sur l'exploitation minière et ses impacts. <http://www.elaw.org/files/mining-eia-guidebook/Chapitre%201.pdf>. 19 octobre 2011.

Environmental Protection Agency. (2008). Effects of Acid Rain - Surface Waters and Aquatic Animals. http://epa.gov/acidrain/effects/surface_water.html. 18 novembre 2011.

European Environment Agency et Swiss Federal Office for the Environment. (2011). Landscape fragmentation in Europe (Luxembourg: Publications Office of the European Union).

Garcia, D.H. (2008). Overview of international mine closure guidelines. In American Institute of Professional Geologists, 3e International Professional Geology Conference, Meeting of the American Institute of Professional Geologists, Flagstaff, Arizona, 20-24 septembre 2008. <http://na.srk.com/files/File/papers/Mine-Closure-Guidelines.pdf>. 23 décembre 2011.

Gauthier, S., Vaillancourt, M.-A., Leduc, A., DeGrandpré, L., Kneeshaw, D., Morin, H., Drapeau, P., et Bergeron, Y. (2008). Aménagement écosystémique en forêt boréale (Québec : Presse de l'Université du Québec).

Génivar. (2009). Projet minier aurifère Canadian Malartic, Résumé de l'étude d'impact sur l'environnement, rapport en commandite à la corporation minière Osisko. http://www.osisko.com/pdfs/AA106790_FINAL.pdf. 20 octobre 2011.

Ghose, M.K. (2004). Restoration and revegetation strategies for degraded mine land for sustainable mine closure. *Land Contam. Recl.* 12, 363-378.

Ginocchio, R. et Baker, A.J.M. (2004). Metallophytes in Latin America: a remarkable biological and genetic resource scarcely known and studied in the region. *Revista chilena de historia natural* 77, 185-194.

Gouvernement du Canada. (2006). Guide d'information minière pour les communautés autochtones. <http://www.rncan.gc.ca/mms-smm/abor-auto/pdf/kit-gui-fra.pdf>, 13 octobre 2011.

Gouvernement du Québec. (2011). Le potentiel économique : les ressources minérales. <http://www.plannord.gouv.qc.ca/potentiel/minerales.asp>. 8 janvier 2012.

Government of Queensland. (1995). Revegetation methods. www.derm.qld.gov.au/register/p01206ba.pdf. 30 novembre 2011.

Hilson, G. (2001). Mining and sustainable development: the African case. *Mineral and Energy* 16, 27-36.

International Council on Mining and Metals. (2006). Guidance paper : financial assurance for mine closure and reclamation. <http://www.icmm.com/page/1232/guidance-paper-financial-assurance-for-mine-closure-and-reclamation>. 21 décembre 2011.

International Council on Mining and Metals. (2005). Financial assurance for mine closure and reclamation. www.icmm.com/document/282. 21 décembre 2011.

International Institute for Environment and Development and World Business Council for Sustainable Development. (2002a). Mining, Minerals, and Sustainable Development (MMSD): the report of the MMSD project. <http://pubs.iied.org/pdfs/9084IIED.pdf>. 3 octobre 2011.

International Institute for Environment and Development and World Business Council for Sustainable Development. (2002b). Mining for the future, appendix C : abandoned mining working paper, minerals, and sustainable development (MMSD): the report of the MMSD project. <http://pubs.iied.org/pdfs/G00882.pdf>. 8 janvier 2012.

International Union for Conservation of Nature and Natural Resources et International Council on Mining and Metals. (2004). Integrating Mining and Biodiversity Conservation Case studies from around the world. <http://liveassets.iucn.getunik.net/downloads/miningbiodiversitycasestudies.pdf>. 3 octobre 2011.

Ley general del ambiente, Ley n° 28611.

Ley que regula la cierre de minas, Ley n° 28090.

Loi sur les mines, L.R.Q., c. M-13.1.

Loi sur la qualité de l'environnement, L.R.Q., c. Q-2.

López Pamo, E., Aduvire, O et Barettino, D. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero* 113, 3-21.

Marjolaine Leblanc, Comité permanent sur l'environnement à Rouyn-Noranda et Direction régionale Abitibi-Témiscamingue du Ministère de l'Environnement. (1982). Colloque national sur la restauration des parcs à résidus miniers (Rouyn-Noranda : Direction régionale).

Melanson, M. (2006). Analyse d'un système de traitement passif pour le site de la mine Eustis. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.

Mendez, M.O. et Maier, R.M. (2008a). Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments - an emerging remediation technology. *Environ. Health Persp.* 116, 278-283.

Mendez, M.O., et Maier, R.M. (2008b). Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 7, 47-59.

Mining watch Canada. (2001). Mining in remote areas issues and Impacts: a community primer http://www.cpaws-sask.org/common/pdfs/mine_impacts_kit.pdf. 25 octobre 2011.

Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs. (2005). Directive 019 sur l'industrie minière. http://www.mddep.gouv.qc.ca/milieu_ind/directive019/directive019.pdf. 15 janvier 2012.

Ministère des Ressources naturelles. (1997). Guide et modalités de préparation du plan et exigences générales en matière de restauration des sites miniers au Québec. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/mines/restauration/restauration-guifrmn.pdf>. 3 octobre 2011.

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. (2011a). Restauration minière. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/mines/restauration/index.jsp>. 3 novembre 2011.

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. (2011b). Un trésor sous nos pieds, de l'exploration à la transformation. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/tresor-sous-nos-pieds/transformation/tresor-transformation.jsp>. 18 octobre 2011.

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. (2011c). Un trésor sous nos pieds, restauration des sites. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/tresor-sous-nos-pieds/restauration/tresor-restauration.jsp>. 18 octobre 2011.

Ministerio de energía y minas de la República del Perú. (2006). Guía para la elaboración de planes de cierre de minas. http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guia_cierre.pdf. 15 novembre 2011.

Ministerio de Energia y Minas. (s.d.a). Guía Ambiental Para el Manejo de Relaves Mineros <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/relaveminero.PDF>. 11 janvier 2012.

Ministerio de Energia y Minas. (s.d.b). Guía Ambiental Para el Cierre y Abandono de Minas. <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/cierreabandono.pdf>. 11 janvier 2012.

Nagajyoti, P.C., Lee, K.D. et Sreekanth, T.V.M. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environ. Chem. Lett.* 8, 199-216.

National Orphaned/Abandoned Mines Initiative. (s.d.). Task groups. <http://www.abandoned-mines.org/taskgroups-e.htm>. 18 janvier 2012.

National Orphaned/Abandoned Mines Initiative. (2003). Lessons learned on community involvement in the remediation of orphaned and abandoned mines, case studies and analysis. <http://www.abandoned-mines.org/pdfs/LessonsLearned.pdf>. 18 janvier 2012.

Northeastern Research Center for Wildlife Diseases, Registry of Comparative Pathology et Institute of laboratory Animal Resources. (1979). Animals as monitors of environmental pollutants (Washington : National Academy of Science).

Olivier, M.J. (2009). Chimie de l'environnement, 6e édition (Lévis : Jacques Bernier).

Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. (1992). Foresterie en zones arides - Guide à l'intention des techniciens de terrain, chapitre VII - plantations forestières irriguées. <http://www.fao.org/docrep/T0122F/t0122f0d.htm>. 17 janvier 2012.

Pêches et Océans Canada. (2010). L'habitat du poisson et les pratiques agricoles. <http://www.nfl.dfo-mpo.gc.ca/f0004434>. 18 novembre 2011.

Prach, K. et Hobbs, R.J. (2008). Spontaneous succession versus technical reclamation in the restoration of disturbed sites. *Restor. Ecol.* 16, 363-366.

Reglamento para el cierre de minas, Decreto supremo n° 033-20005-EM.

Règlement sur les substances minérales autres que le pétrole, le gaz naturel et la saumure, R.R.Q., c. M-13, r.2.

Ruiz-Jaen, M.C. (2005). Restoration Success: How Is It Being Measured? *Restor. Ecol.* 13, 569-577.

Schroeder, V., Gange, A.C., et Stead, A.D. (2011). Underground networking: the potential

for improving yield and quality of pot-grown herbs with mycorrhizas. *J. Sci. Food Agr.* 92, 203-206.

Société canadienne d'hypothèque et de logement. (2011). Apprenez à connaître votre sol http://www.cmhc-schl.gc.ca/fr/co/enlo/ampa/ampa_001.cfm. 17 janvier 2011.

Society for Ecological Restoration International et International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. (2004). Ecological Restoration, a means of conserving biodiversity and sustaining livelihoods. https://www.ser.org/pdf/Global_Rationale.pdf. 3 octobre 2011.

Society for Ecological Restoration International et Policy Working Group (SER). (2004). The SER international primer on ecological restoration. Version 2. <http://www.ser.org/pdf/primer3.pdf>. 3 octobre 2011.

Société Makivik. (2011). La Convention de la Baie-James et du Nord québécois. <http://www.makivik.org/fr/history/jbnqa/>. 9 novembre 2011.

The James Bay and Northern Quebec Agreement. (1975). <http://www.gcc.ca/pdf/LEG000000006.pdf>. 9 novembre 2011.

The Pennsylvania Department of Environmental Protection. (1998). Coal Mine Drainage Prediction and Pollution Prevention in Pennsylvania <http://www.dep.state.pa.us/dep/deputate/minres/districts/cmdp/main.htm>. 26 octobre 2011.

Thomas, H.F. et Pacey, A.J. (2004). New Peruvian Mine Closure Requirements. <http://web.idrc.ca/uploads/user-S/11199732261mem.pdf>. 17 novembre 2011.

Tordoff, G.M., Baker, A.J.M et Willis, A.J. (2000). Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. *Chemosphere* 41, 219 – 228.

Tripathi, N. et Singh, R.S. (2008). Ecological restoration of mined-out areas of dry tropical environment, India. *Environ. Monit. Assess.* 146, 325–337.

United Nations Environment Programme, United Nations Development Program, Organization for Security and Co-operation in Europe et North Atlantic Treaty Organization. (2005). Mining for closure: policies, and guidelines for sustainable mining practice and closure of mines. http://www.grida.no/files/publications/envsec/mining-for-closure_src.pdf. 3 octobre 2011.

Warhust, A. (1994). Environmental degradation from mining and mineral processing in developing countries : corporate response and national policies (Paris : Organisation for economic co-operation and development).

Whiting, S.N., Reeves, R.D., Richards, D., Johnson, M.S., Cooke, J.A., Malaisse, F., Patron, A., Smith, J.A.C., Angle, J.S., et al. (2004). Research priorities for conservation of metallophyte biodiversity and their potential for restoration and site remediation. *Restor. Ecol.* 12, 106-116.

World Bank et International Finance Corporation. (2002a). It's not over when it's over: mine closure around the world. Mining and development. <http://siteresources.worldbank.org/INTOGMC/Resources/notoverwhenover.pdf>. 3 octobre 2011.

World Bank et International Finance Corporation. (2002b). Treasure or trouble? Mining in developing countries. <http://siteresources.worldbank.org/INTOGMC/Resources/treasureortrouble.pdf>. 3 octobre 2011.

.

Bibliographie

Moon, C.J., Whateley, M.K.G., et Evans, A.M. (2006). Introduction to mineral exploration, second edition (Malden, Oxford, Victoria: Blackwell publishing).

Perrow, M.R. et Davy, A.J. (2002). Ecological restoration. Volume 2 : Restoration in practice. (Cambridge : Cambridge University Press).

The World Conservation Union et International Council on Mining and Metals. (2008). Roundtable on restoration of legacy sites. <http://www.icmm.com/document/511>. 19 janvier 2012.

Urbanska, K.M., Webb, N.R. et Edwards, P.J. (1997). Restoration ecology and sustainable development (Cambridge : Cambridge University Press).

World Bank et International Finance Corporation. (2002). Large mines and local communities: forging partnerships, building sustainability. <http://siteresources.worldbank.org/INTOGMC/Resources/largemineslocalcommunities.pdf>. 3 octobre 2011.

ANNEXE 1

Liste des pays en développement considérés pays miniers basé sur le pourcentage d'exportations minières, 1990-1999

Position	pays	Exportations minières (%)	Populations, 2000 (millions)	Revenu national brut/capital (US\$)	Produit intérieur brut/croissance en capital (%)
1	Guinée	84,7	7,4	490	1,42
2	Rép. Dém. Congo	80,0	51,4	100	-6,00
3	Zambie	74,8	10,1	320	-2,33
4	Niger	70,6	10,8	190	-1,50
5	Bostwana	70,0	1,6	3 040	2,53
6	Namibie	55,4	1,7	2 100	1,60
7	Jamaïque	51,3	2,6	2 400	-0,13
8	Sierra Leone	50,0	5,0	130	-6,31
9	Suriname	48,3	0,4	1 350	2,71
10	Chili	46,6	15,2	4 600	4,86
11	Mauritanie	46,0	2,7	390	0,55
12	Pap. Nouv. Guinée	44,8	4,8	810	2,11
13	Pérou	43,7	25,7	2 130	1,50
14	Mongolie	43,0	2,4	390	-1,64
15	Rép. Centrafricaine	42,1	3,6	290	-0,82
16	Ukraine	40,0	49,6	770	-8,63
17	Mali	40,0	10,8	240	0,69
18	Togo	37,7	4,7	310	-1,27
19	Bolivie	35,6	8,3	990	1,63
20	Guyane	35,0	0,9	760	4,00
21	Ghana	34,0	19,2	400	1,55
22	Afrique du Sud	30,0	42,8	3 160	-0,67
23	Jordanie	28,9	4,9	1 630	0,40
24	Kazakhstan	23,2	14,9	1 290	-4,36

25	Kirghizistan	21,2	4,9	300	-4,58
26	Maroc	20,0	28,7	1 190	0,73
27	Arménie	20,0	3,8	490	-2,60
28	Ouzbékistan	18,4	24,7	640	-2,46
29	Cuba	17,8	11,2	500	5,60
30	Tanzanie	15,8	33,7	260	0,36
31	Rép. Yougoslave de Macédoine	13,1	2,0	1 660	-0,90
32	Russie	12,3	145,5	1 750	-4,89
33	Zimbabwe	12,2	12,1	530	0,74
34	Brésil	10,9	170,1	3 880	0,40
35	Bulgarie	10,3	8,2	1 390	-2,54
36	Sénégal	10,3	9,5	500	0,56
37	Angola	10,0	12,7	220	-2,23
38	Gabon	8,1	1,2	3 280	0,11
39	Albanie	7,6	3,4	930	-0,08
40	Pologne	7,5	38,7	4 060	4,60
41	Tunisie	7,5	9,6	2 090	3,30
42	Yougoslavie	7,2	10,6	1 660	-0,90
43	Cameroun	7,2	15,1	600	-2,31
44	Rep. Dominicaine	7,2	8,6	1 920	2,68
45	Madagascar	7,1	15,5	250	-1,25
46	Soudan	7,0	29,7	310	7,00
47	Burkina Faso	6,9	11,3	240	1,37
48	Indonésie	6,0	210,4	580	3,10
49	Égypte	5,8	63,8	1 380	2,41
50	Inde	3,8	1 015,9	440	3,73
51	Chine	1,9	1 261,1	780	8,52

Traduction libre

Source : World Bank et International Finance Corporation (2002b)